



Universidad Politécnica de Madrid



Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía,
Geodesia y Cartografía

Máster en Ingeniería Geodésica y Cartografía

Trabajo Fin de Máster

ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN PUERTO PRÍNCIPE (HAITÍ)

Julio 2012

Alumna:

Yolanda Torres F.

Tutores:

Belén Benito (Universidad Politécnica de Madrid)

Sergio Molina (Universidad de Alicante)

Este Trabajo Fin de Máster supone la culminación de una etapa más en mi formación y el comienzo de otra, aun más importante.

Quiero dedicar este trabajo a todas las personas que han confiado en mí desde el principio y que me acompañan y me animan a seguir cada día, a pesar de las adversidades, para que consiga mi meta.

A Javier, que es mi fuerza y mi inspiración.

A mis padres y mis hermanos, que tantos esfuerzos han hecho siempre.

A mis tutores, porque me han dado cada día la oportunidad de aprender.

A mis compañeros de trabajo, por su apoyo.

A mis compañeros de clase, por todo lo compartido durante dos años.

A mis profesores, porque verdaderamente creo en su labor.

Y al pueblo haitiano, que me ha enseñado que este mundo es insultantemente injusto. Sin embargo, a pesar de ello, tienen la esperanza de que pequeñas contribuciones como ésta den lugar a un cambio.

A todos vosotros, muchísimas gracias.

Índice

1. RESUMEN	4
2. INTRODUCCIÓN	6
3. MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES	8
4. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	10
5. MARCO DE ACTUACIÓN	11
6. MARCO SISMO-TECTÓNICO	17
7. EL PAPEL DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA GESTIÓN DE LOS RIESGOS NATURALES	24
7.1. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE PROYECTO	26
8. ANÁLISIS DE DAÑOS CAUSADOS POR EL TERREMOTO DE ENERO DE 2010	29
8.1. PRÁCTICAS DE CONSTRUCCIÓN LOCALES COMO RESPONSABLES DE LA ALTA VULNERABILIDAD SÍSMICA	31
8.2. ANÁLISIS DEL POSIBLE EFECTO LOCAL DURANTE EL SISMO DE ENERO DE 2010	39
9. CÁLCULO DEL RIESGO SÍSMICO EN PUERTO PRÍNCIPE	48
9.1. EXPOSICIÓN	50
9.1.1. Estudio del parque inmobiliario y clasificación en tipologías constructivas	50
9.1.2. Asignación de las funciones de daño que caracterizan la vulnerabilidad sísmica	58
9.2. PELIGRO	63
9.2.1. Definición de escenarios sísmicos deterministas	63
9.2.2. Selección de modelos de predicción del movimiento fuerte del suelo	65
9.2.3. Consideración del efecto local.....	68
9.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO PROPUESTO CON DATOS DE DAÑOS DEL TERREMOTO DE ENERO DE 2010	69
9.3.1. Fase 1. Elección de los modelos de movimiento fuerte del suelo y valores de Vs30 ...	71
9.3.2. Fase 2. Calibración de las funciones de daño.....	78
9.4. CÁLCULO DEL RIESGO SÍSMICO CON EL MODELO CALIBRADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	82
10. CONCLUSIONES	92
11. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y ECONÓMICA DEL ESTUDIO	95
12. LÍNEAS FUTURAS	98
13. DIFUSIÓN DEL TRABAJO	99
14. REFERENCIAS.....	102
15. ANEXOS.....	108
15.1. NORMATIVA DE RIESGOS LABORALES	108
15.2. IMPACTO AMBIENTAL	111



1. Resumen

Tras el devastador terremoto del 12 de enero de 2010 en Puerto Príncipe, Haití, las autoridades locales, numerosas ONGs y organismos nacionales e internacionales están trabajando en el desarrollo de estrategias para minimizar el elevado riesgo sísmico existente en el país. Para ello es necesario, en primer lugar, estimar dicho riesgo asociado a eventuales terremotos futuros que puedan producirse, evaluando el grado de pérdidas que podrían generar, para dimensionar la catástrofe y actuar en consecuencia, tanto en lo referente a medidas preventivas como a adopción de planes de emergencia.

En ese sentido, este Trabajo Fin de Master aporta un análisis detallado del riesgo sísmico asociado a un futuro terremoto que podría producirse con probabilidad razonable, causando importantes daños en Puerto Príncipe. Se propone para ello una metodología de cálculo del riesgo adaptada a los condicionantes de la zona, con modelos calibrados empleando datos del sismo de 2010. Se ha desarrollado en el marco del proyecto de cooperación Sismo-Haití, financiado por la Universidad Politécnica de Madrid, que comenzó diez meses después del terremoto de 2010 como respuesta a una petición de ayuda del gobierno haitiano.

El cálculo del riesgo requiere la consideración de dos inputs: la amenaza sísmica o movimiento esperado por el escenario definido (sismo de cierta magnitud y localización) y los elementos expuestos a esta amenaza (una clasificación del parque inmobiliario en diferentes tipologías constructivas, así como su vulnerabilidad). La vulnerabilidad de estas tipologías se describe por medio de funciones de daño: espectros de capacidad, que representan su comportamiento ante las fuerzas horizontales motivadas por los sismos, y curvas de fragilidad, que representan la probabilidad de que las estructuras sufran daños al alcanzar el máximo desplazamiento horizontal entre plantas debido a la mencionada fuerza horizontal. La metodología que se propone especifica determinadas pautas y criterios para estimar el movimiento, asignar la vulnerabilidad y evaluar el daño, cubriendo los tres estados del proceso. Por una parte, se consideran diferentes modelos de movimiento fuerte incluyendo el efecto local, y se identifican los que mejor ajustan a las observaciones de 2010. Por otra se clasifica el parque inmobiliario en diferentes tipologías constructivas, en base a la información extraída en una campaña de campo y utilizando además una base de datos aportada por el Ministerio de Obras Públicas de Haití. Ésta contiene información relevante de todos los edificios de la ciudad, resultando un total de 6 tipologías. Finalmente, para la estimación del daño se aplica el método capacidad-demanda implementado en el programa SELENA (Molina et al., 2010).

En primer lugar, utilizado los datos de daño del terremoto de 2010, se ha calibrado el modelo propuesto de cálculo de riesgo sísmico: cuatro modelos de movimiento fuerte, tres modelos de tipo de suelo y un conjunto de funciones de daño. Finalmente, con el modelo calibrado, se ha simulado un escenario sísmico determinista correspondiente a un posible terremoto con epicentro próximo a Puerto Príncipe. Los resultados muestran que los daños estructurales serán considerables y podrán llevar a pérdidas económicas y humanas que causen un gran impacto en el país, lo que pone de manifiesto la alta vulnerabilidad estructural existente. Este resultado será facilitado a las autoridades locales, constituyendo una base sólida para toma de decisiones y adopción de políticas de prevención y mitigación del riesgo. Se recomienda dirigir esfuerzos hacia la reducción de la vulnerabilidad estructural - mediante refuerzo de edificios vulnerables y adopción de una normativa sismorresistente- y hacia el desarrollo de planes de emergencia.



Abstract

After the devastating 12 January 2010 earthquake that hit the city of Port-au-Prince, Haiti, strategies to minimize the high seismic risk are being developed by local authorities, NGOs, and national and international institutions. Two important tasks to reach this objective are, on the one hand, the evaluation of the seismic risk associated to possible future earthquakes in order to know the dimensions of the catastrophe; on the other hand, the design of preventive measures and emergency plans to minimize the consequences of such events.

In this sense, this Master Thesis provides a detailed estimation of the damage that a possible future earthquake will cause in Port-au-Prince. A methodology to calculate the seismic risk is proposed, adapted to the study area conditions. This methodology has been calibrated using data from the 2010 earthquake. It has been conducted in the frame of the Sismo-Haiti cooperative project, supported by the Technical University of Madrid, which started ten months after the 2010 earthquake as an answer to an aid call of the Haitian government.

The seismic risk calculation requires two inputs: the seismic hazard (expected ground motion due to a scenario earthquake given by magnitude and location) and the elements exposed to the hazard (classification of the building stock into building typologies, as well as their vulnerability). This vulnerability is described through the damage functions: capacity curves, which represent the structure performance against the horizontal forces caused by the seisms; and fragility curves, which represent the probability of damage as the structure reaches the maximum spectral displacement due to the horizontal force.

The proposed methodology specifies certain guidelines and criteria to estimate the ground motion, assign the vulnerability, and evaluate the damage, covering the whole process. Firstly, different ground motion prediction equations including the local effect are considered, and the ones that have the best correlation with the observations of the 2010 earthquake, are identified. Secondly, the classification of building typologies is made by using the information collected during a field campaign, as well as a data base provided by the Ministry of Public Works of Haiti. This data base contains relevant information about all the buildings in the city, leading to a total of 6 different typologies. Finally, the damage is estimated using the capacity-spectrum method as implemented in the software SELENA (Molina et al., 2010).

Data about the damage caused by the 2010 earthquake have been used to calibrate the proposed calculation model: different choices of ground motion relationships, soil models, and damage functions. Then, with the calibrated model, a deterministic scenario corresponding to an epicenter close to Port-au-Prince has been simulated. The results show high structural damage, and therefore, they point out the high structural vulnerability in the city. Besides, the economic and human losses associated to the damage would cause a great impact in the country.

This result will be provided to the Haitian Government, constituting a scientific base for decision making and for the adoption of measures to prevent and mitigate the seismic risk. It is highly recommended to drive efforts towards the quality control of the new buildings - through reinforcement and construction according to a seismic code- and the development of emergency planning.



2. Introducción

El terremoto de Haití conmovió al mundo y multitud de países enviaron ayuda, no sólo económica, sino también recursos humanos y materiales, a la vez que se gestaban proyectos de cooperación de diversa índole. En este sentido, el Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica (GIIS) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) puso en marcha el proyecto Sismo-Haití, que ha sido financiado por la propia Universidad, para calcular la peligrosidad Haití y el riesgo sísmico en Puerto Príncipe. Su objetivo global es el desarrollo de acciones de mitigación del elevado riesgo existente en el país, contribuyendo al desarrollo sostenible de la región. Y es que la catástrofe que ha supuesto el terremoto de enero de 2010 pone de manifiesto la necesidad de adoptar medidas preventivas y de diseñar planes de emergencia para preparar a la población y evitar que futuros terremotos en el país causen catástrofes similares.

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) se enmarca dentro de dicho proyecto, y se corresponde con el segundo objetivo general: estimación del riesgo sísmico en Puerto Príncipe.

En los proyectos de cooperación es muy importante trabajar con técnicos locales y darles formación, y no limitar su actuación a la de ser meros receptores de resultados. La contraparte local de este proyecto ha sido el Observatorio de Vulnerabilidad y Medioambiente de Haití (ONEV), y durante una campaña de campo que se realizó en Puerto Príncipe para la toma de datos, se trabajó con ingenieros del ONEV, a los que se capacitó para recopilar información determinante sobre edificios para caracterizar su vulnerabilidad sísmica.

El vínculo creado con la contraparte es totalmente necesario en relación con la aplicabilidad de los resultados que se han obtenido en este estudio, que es uno de los elementos que no siempre queda resuelto en los proyectos de cooperación. El trabajo conjunto con el ONEV garantiza que los resultados lleguen a las instituciones competentes y se integren en los planes de emergencia ante el riesgo sísmico que defina el gobierno haitiano. De la misma forma, se abren puertas a futuras colaboraciones y se facilita la continuidad de estas acciones.

Este tipo de estudios, generalmente, son llevados a cabo por un grupo de trabajo compuesto por especialistas de distintas ramas relacionadas con la temática. En este caso, se ha trabajado con sismólogos, geólogos, arquitectos, e ingenieros, tanto de España como de Haití. La interacción entre las tareas que han llevado a cabo los componentes de este equipo internacional y multidisciplinar de trabajo, se ha visto facilitada por el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) diseñado para el proyecto. Éste se ha implementado para homogeneizar todos los datos que ha sido necesario recopilar para desarrollar el estudio y para facilitar su manejo e integración. El SIG ha dado apoyo a todas las fases de ejecución del proyecto, especialmente en el análisis espacial, en la toma de decisiones y en la representación y difusión de resultados.



El presente documento se estructura de la siguiente manera:

Tras un resumen inicial y este segundo apartado de introducción, los apartados 3 y 4 describen la motivación, los antecedentes y los objetivos de este TFM. En los dos siguientes (apartados 5 y 6), se describe el marco de actuación y el marco sismo-tectónico del área de estudio.

A continuación, en el apartado 7, se expone el papel de los SIG en los estudios de riesgos naturales y se explica la implementación del SIG de este proyecto.

El apartado 8 hace un recorrido por los efectos del terremoto de 2010, tanto de los daños en las estructuras como del efecto local.

La estimación del riesgo sísmico completo se presenta en el apartado 9, donde se describe el modelo de cálculo propuesto, su calibración y su aplicación simulando un escenario determinista.

Finalmente, los apartados 10, 11, 12 y 13 exponen las conclusiones, la planificación temporal y económica del estudio, las líneas futuras y la difusión del trabajo.



3. Motivación y antecedentes

El 12 de enero de 2010, a las 16:53 hora local, un terremoto de magnitud momento Mw 7,0 y profundidad hipocentral 13 km sacudió el sur de Haití, el país más pobre del continente americano. El epicentro se localizó a 25 km al suroeste de la capital, Puerto Príncipe. Ciudades como Léogâne, Gressier, Carrefour o la capital quedaron casi destruidas (unas 300.000 viviendas sufrieron daño severo o colapso), 316.000 personas perdieron la vida, 350.000 resultaron heridas y más de 1,3 millones quedaron sin hogar (USGS, terremoto de Haití), teniendo que ser trasladados a los campamentos instalados en los espacios abiertos de las ciudades. Con esas cifras, el terremoto de Haití se puede considerar una de las mayores tragedias humanitarias de la historia.

Un mes después (el 27 de febrero de 2010), otro terremoto somero ocurrió frente a la costa de Maule, en Chile, con Mw 8,8, causando algo más de 500 muertes y dañando unas 370.000 viviendas (USGS, terremoto de Chile). El año siguiente (el 11 de marzo de 2011), Japón sufrió el mayor sismo de sus últimos 140 años. Éste ocurrió en el mar, con una Mw 9,0 y generó un tsunami que alcanzó unos 10 m de altura, responsable de la mayoría de los daños (más de 300.000 viviendas afectadas), muertes (casi 16.000) y desplazados (unos 140.000) (USGS, terremoto de Japón). En la Tabla 1 se resumen estos datos.

Tabla 1. Resumen de los terremotos de Haití y Chile, en 2010, y Japón, en 2011.

Terremoto	Mw	Profundidad	Daños	Muertos	Desplazados
Haití, enero 2010	7,0	13 km	97.294 casas destruidas y 188.383 dañadas	316.000	1,3 millones
Chile, febrero 2010	8,8	35 km	En 370.000 casas En 4,013 escuelas En 79 hospitales	523	800.000
Japón, marzo 2011	9,0	30 km	En 332,395 casas En 2,126 carreteras En 56 puentes	15.703	130.927

Como puede observarse, la magnitud de la catástrofe en Haití fue mucho mayor que en los casos de Chile y Japón, países habituados a los seísmos y preparados para hacerles frente, aun siendo estos dos eventos 1000 veces más potentes en términos de energía liberada. La principal razón se encuentra en la alta vulnerabilidad social y estructural de Haití ante los terremotos. Este hecho evidencia la relación directa entre el aumento del efecto negativo producido por los terremotos y la vulnerabilidad de la zona afectada, factor que indica la capacidad de daño de los elementos expuestos a un peligro. Dicho de otra forma, la vulnerabilidad es la probabilidad de que el elemento expuesto sufra daños o se vea afectado, de manera que a mayor vulnerabilidad, mayor será la probabilidad de sufrir daños. Por tanto, la magnitud de un terremoto (determinante del peligro o amenaza) no puede relacionarse de una manera simple y directa con su poder destructor, pues la buena preparación de una sociedad (resiliencia), tanto en cuanto a la calidad de sus construcciones, como a la buena planificación de la gestión de la emergencia, como a la



educación de los ciudadanos, puede paliarlo. Es ahí donde este TFM encuentra su motivación, pues está enfocado de forma que sus resultados contribuyan a la construcción de una sociedad más resiliente en Haití.

El grupo GIIS tiene dilatada experiencia en el campo de la cooperación universitaria al desarrollo, avalada por los proyectos de peligrosidad y riesgo sísmico llevados a cabo durante más de 10 años en países de Europa del este y, especialmente, en América Central (<http://www2.topografia.upm.es/grupos/sismo/?lang=es>). Ello ha proporcionado al grupo el conocimiento necesario sobre la problemática de la zona, tanto a nivel técnico como logístico. Ahora, su continuidad hacia el área del Caribe supone, por un lado, la consolidación de las relaciones establecidas con investigadores de los países centroamericanos y más recientemente de Haití, República Dominicana y Puerto Rico, y por otro, el reforzamiento y la ampliación del sólido marco de trabajo ya creado, en el que unificar todas las acciones emprendidas hasta ahora, así como las futuras.

Entre los proyectos de cooperación realizados por el grupo GIIS, se encuentran varios estudios de riesgo sísmico a escala local, como el que se presenta en este TFM. En 2010 se realizó el cálculo del riesgo sísmico en las capitales de los seis países centroamericanos (Ciudad de Guatemala, el Salvador, Tegucigalpa, Managua, San José y Ciudad de Panamá) en el marco del proyecto RESIS II (*Earthquake Risk Reduction in Central America, part II*), financiado por la Agencia de Cooperación Noruega (NORAD), habiendo realizado previamente en cálculo de la peligrosidad sísmica a escala regional. En 2011 se realizaron estudios de riesgo sísmico en cuatro municipios del sureste de España (Almería, Lorca, Alhama de Granada y Adra), elegidos por ser la región de mayor peligrosidad de nuestro país y de cara a la futura implementación de los planes municipales de emergencias ante este tipo de riesgo natural (Directriz Básica de Planificación de Protección Civil). En todos ellos se siguió la misma metodología que se ha aplicado en el presente TFM, acorde con el estado del arte, que se explicará en el apartado 9. Se trata de una adaptación de las metodologías desarrolladas en Hazus (FEMA 2003) y Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) a las condiciones particulares de cada área de estudio. Esta acreditada experiencia en la materia garantiza la correcta ejecución de este TFM.

En todos los estudios previos de riesgo sísmico realizados por el grupo GIIS se han utilizado sistemas de información geográfica, cuyo uso está muy extendido y resultan de gran utilidad en el marco del presente TFM, como se explica en el apartado 7 (El papel de los sistemas de información geográfica en la gestión de los riesgos naturales).

Con los antecedentes descritos, la finalidad última de este TFM es disponer de una estimación del riesgo sísmico en Puerto Príncipe que pueda facilitar la gestión de la emergencia ante eventuales sismos futuros, así como proponer un desarrollo metodológico adaptado a los condicionantes de la zona, que pueda ser replicable en otras poblaciones del país. La capacitación de técnicos locales en la materia ha sido otra importante motivación del trabajo, dirigido en última instancia a la mitigación del elevado riesgo sísmico en el país.



4. Objetivos y alcance

Como se ha concluido anteriormente, la adopción de medidas preventivas, unida a la disponibilidad de planes de emergencia, son las únicas acciones eficaces para minimizar los efectos negativos de un terremoto. Haití está situado en una zona de sismicidad entre moderada y alta en un contexto mundial, y su sociedad ha de estar preparada para los futuros sismos como ya lo están otros países como Chile, Japón o Estados Unidos.

Con esta premisa, el objetivo general de este TFM es evaluar el riesgo sísmico en Puerto Príncipe, capital de Haití, de forma que los resultados puedan utilizarse en la definición de los planes de emergencia ante este riesgo natural, contribuyendo así a la mejora de la seguridad y la habitabilidad en el país.

Los objetivos específicos que se han llevado a cabo para alcanzar ese objetivo general son los siguientes:

1. Análisis de los daños causados por el terremoto de enero de 2010 en Puerto Príncipe.
2. Evaluación del posible efecto local en Puerto Príncipe a partir de los daños registrados en el terremoto de enero de 2010, la topografía y el mapa de microzonación.
3. Análisis del parque inmobiliario de la ciudad y clasificación del mismo en tipologías constructivas.
4. Asignación de funciones de daño (espectros de capacidad y curvas de fragilidad) para estimar el daño dependiendo de la vulnerabilidad de cada tipología.
5. Estudio de los modelos de predicción del movimiento fuerte del suelo más adecuados para el área de estudio.
6. Simulación de un escenario sísmico correspondiente al terremoto de enero de 2010 y calibración del modelo de cálculo de daños.
7. Estudio de la tectónica activa del área de estudio y definición de un escenario sísmico determinista, correspondiente a un sismo futuro probable.
8. Cálculo del riesgo sísmico correspondiente al escenario definido a partir del modelo calibrado.



5. Marco de actuación

En este apartado se describe el contexto histórico, político, geográfico, económico y social de Haití, con el fin de proporcionar un marco de referencia general del área de estudio.

Historia

El 5 de diciembre de 1492, Cristóbal Colón llegó a La Española, una de las islas que configuran las llamadas Antillas Mayores, y dicha isla pasó a formar parte del Imperio Español. Antes de la llegada de los españoles estaba habitada por las etnias arawak, caribes y taínos, siendo su población estimada entonces de unos 300.000 habitantes.

Con el tiempo, en las zonas despobladas de la parte oeste se fueron asentando los bucaneros, dedicados al comercio de pieles y el cultivo de tabaco, así como los filibusteros, ambos de origen francés. En 1697, España cedió a Francia esa parte de la isla por el Tratado de Ryswick, constituyéndose el Saint Domingue francés.

A mediados del siglo XVIII, el Haití colonial, ocupado por Francia bajo un férreo y cruel sistema esclavista, contaba con una población de 300.000 esclavos y apenas 12.000 personas libres, la mayoría de ellos blancos y mulatos.

La lucha por la independencia de Haití se desarrolló en varias etapas. En la primera, los grandes terratenientes, los esclavos, los comerciantes y los blancos pobres se solidarizaron con el movimiento revolucionario que había estallado en la metrópoli y formaron una asamblea local, que reivindicaba el fin del pacto colonial. En una segunda etapa, los mulatos libres comenzaron a apoyar la revolución metropolitana, creyendo que con eso obtendrían de los blancos residentes en la colonia la plena igualdad de derechos para los hombres libres, independientemente del color.

En 1803, Jean Jacques Dessalines venció definitivamente a las tropas francesas en la batalla de Vertières y en 1804 declaró la independencia de Haití, proclamándose Dessalines emperador. Después de la derrota de los franceses, Haití fue obligado a pagar una indemnización a la antigua metrópoli a cambio del reconocimiento de su independencia, que no se concretó hasta 1838. El gobierno francés indujo un bloqueo contra el azúcar haitiano, de modo que la economía de la pequeña república se vio muy perjudicada.

Tras unas revueltas populares en la parte oriental de la isla de La Española (República Dominicana) en 1821, entonces bajo dominio colonial español, las tropas haitianas invadieron ese país en 1822, y lo ocuparon hasta que recobrara su independencia en 1844. La gran inestabilidad política del país sirvió a Estados Unidos como pretexto para invadirlo en 1915 y ejercer así un control absoluto hasta 1934.

En 1957 fue elegido como Presidente François Duvalier, conocido popularmente como Papa Doc, que gobernó dictatorialmente con ayuda militar y financiera de Estados Unidos



y que en 1964 se hizo proclamar presidente vitalicio. Su hijo Jean-Claude Duvalier (Baby Doc) le sucedió en 1971. En enero de 1986 una insurrección popular le obligó a exiliarse y el ejército se hizo con el control del poder, mediante la formación de un Consejo Nacional de Gobierno, presidido por el general Henri Namphy.

En enero de 1988 ascendió a la Presidencia Leslie François Manigat, pero fue depuesto en julio del mismo año por Namphy, a quien derrocó Prosper Avril. Tras una presidencia provisional de Ertha Pascal Trouillot, depuesta por un golpe de Estado, Jean-Bertrand Aristide fue presidente electo a partir de febrero de 1991, siendo también depuesto, tras una grave crisis interna en el año 2004, que incluyó violentos episodios, que culminaron con la ocupación de Haití por parte de los "Casos Azules" de la ONU. En 2006, René Préval fue elegido presidente del país.

Las elecciones generales más recientes estaban previstas para enero de 2010, pero fueron pospuestas debido al terremoto. Se celebraron finalmente el 28 de noviembre de 2010. Los candidatos más votados fueron Mirlande Manigat y el oficialista Jude Célestin, quedando en tercer lugar Michel Martelly. Este hecho suscitó una crisis electoral, porque se alegó que el candidato oficialista Célestin había sido favorecido por un fraude cometido por el gobierno. El 3 de febrero de 2011 se anunció el pase de Martelly a la segunda vuelta, que se celebraría el 20 de marzo, después de un pacto en el que Célestin desistió de continuar en la contienda. En la segunda ronda presidencial entre Michel Martelly y Mirlande Manigat fue elegido Martelly, actual presidente de la República de Haití.

Organización político administrativa

Haití está dividido en 10 departamentos, 41 distritos y 133 comunas. Estos departamentos pertenecían a las tres provincias originales del Saint-Domingue colonial, que eran Norte, Sur y Oeste. A lo largo del tiempo las provincias se fueron convirtiendo en departamentos. La Figura 1 muestra los departamentos que actualmente existen en el país, con indicación de su capital, población y superficie.

Geografía

Haití es un país que pertenece a la isla de La Española. Abarca una tercera parte de dicha isla y se sitúa al oeste de la República Dominicana, entre el Mar Caribe y el Atlántico Norte (Figura 2). Sus coordenadas geográficas son 72° 25 ' de longitud oeste y 19° 00' de latitud norte. De la totalidad de su área, 27.560 km² son ocupados por tierra y 190 km² por agua.



Figura 1. Organización político administrativa de Haití. Fuente: Wikipedia



Figura 2 Localización de Haití. Fuente: Google Earth

Su punto más elevado está en la sierra Chaîne de la Selle con 2.680 m. El lago más grande es el transfronterizo Lago Azuey, y sus ríos no son muy caudalosos, por lo que en general no son ríos navegables. Se distingue por tener dos penínsulas que forman el golfo



de la Gonave. Entre otras islas que pertenecen a Haití, las mayores son la de Gonave (al oeste) y la de Tortuga (al norte).

La región norte consiste en el Macizo y el Llano del Norte. El macizo es una extensión de la Cordillera Central de la República Dominicana. Comienza en la frontera este de Haití, al norte del río Guayamouc, y se extiende al noroeste por la Península. Las tierras bajas del Llano del Norte están ubicadas sobre la frontera norte con la República Dominicana, entre el Macizo del Norte y el océano Atlántico. La región central está formada por dos llanos y dos sierras.

La región sur consiste en el Plano Callejón Sin Salida y la península Montañosa (conocida como Tiburón). El Plano Callejón sin Salida es una depresión natural que abriga a los lagos salinos del país y al lago más grande del Haití, el Lago Azuey.

Con respecto a las cosechas, el valle más importante del país es el de Artibonito, que está ubicado al sur de las Montañas del Norte. En esta región se encuentra el río más largo del país y de la isla, el río Artibonito.

Clima y Medioambiente

El clima de Haití es tropical en las costas y frío en las montañas. Las épocas más lluviosas son de abril a junio y de octubre a noviembre. El calor disminuye gracias a las brisas marinas. Es frecuente la presencia de depresiones tropicales y ciclones, sobre todo en los meses de septiembre y de octubre.

Haití en 1925 tenía el 60% de sus bosques originales destruidos. Hoy en día el porcentaje ha aumentado al 98%, al haber sido utilizada su madera para combustible, destruyendo además, en este proceso, multitud de suelos fértiles. La erosión debida a la deforestación ha causado inundaciones. La tormenta tropical Jeanne (septiembre 2004) acabó con la vida de más de 3.000 personas y destruyó carreteras.

Economía

Haití tiene la renta per cápita más baja de todo el hemisferio occidental, y es el país más pobre de toda América. Los indicadores sociales y económicos colocan a Haití en puestos descendentes, detrás de otros países en vías en desarrollo de bajos ingresos desde los años 80.

Aproximadamente un 70% de la población vive en la pobreza. Cerca del 70% de los haitianos depende de la agricultura, que consiste principalmente en agricultura de subsistencia a pequeña escala y da empleo a cerca de las dos terceras partes de la población económicamente activa. La única parte de la economía que está en crecimiento es la *economía informal*. El fracaso en el intento de lograr acuerdos con patrocinadores internacionales ha impedido que Haití obtenga asistencia para un presupuesto y programas de desarrollo.

La pobreza resulta extrema en gran parte de la población, tanto que sus ingresos no les alcanza para adquirir un poco de arroz u otros alimentos básicos, lo que acarrea secuelas



de desnutrición y otros males físicos. La FAO estima que la mitad de la población se encuentra en situación de extrema pobreza, con menos de 1 dólar al día.

Un factor que podría hacer que la economía no mejore es la falta de empuje por parte de los profesionales, pues se cree que un 80% de los haitianos con niveles educativos elevados han emigrado en busca de otras alternativas. También es importante señalar la fuerte emigración ilegal hacia la República Dominicana a través de la frontera. Aunque su carácter informal no permite un cálculo preciso, la población inmigrante haitiana en la nación vecina se estima en más de un millón de personas.

Haití recibe anualmente cooperación y ayuda humanitaria de países desarrollados, tanto de América, como de otras partes del mundo. La ayuda extranjera compone aproximadamente el 30–40% del presupuesto nacional del gobierno, siendo de importancia mencionar a Estados Unidos, la Unión Europea (citando como de especial importancia a España) Canadá, Argentina, Brasil, Chile, México, Colombia, Venezuela y Cuba.

En 2005 la deuda externa total de Haití estaba cifrada en 1.300 millones de dólares, que significa una deuda per cápita de 169 dólares. En septiembre de 2009, Haití alcanzó las condiciones marcadas por el Fondo Monetario Internacional (FMI) y el programa de países pobres con una elevada deuda del Banco Mundial para poder cancelar su deuda externa.

Sociedad

Los primeros pobladores de Haití llegaron a la isla de La Española sobre el año 7000 a.C. Su procedencia se cree que era de Florida. Eran recolectores, cazadores y pescadores.

En el año 1000 llegan los arahuacos. Cuando llegaron los europeos, la isla se encontraba dividida en los llamados Cacicazgos de Quisqueya.

La pequeña isla Tortuga, cerca de la costa norte de la isla, fue base de operaciones de saqueo de las islas contiguas por los piratas asociados en la Hermandad Hermanos de la Costa. Se dividían en filibusteros, que acechaban las presas y se lanzaban al abordaje; bucaneros, normalmente franceses, que se dedicaban a cazar reses alzadas, o a robarlas de las haciendas para secar los cueros y ahumar las carnes que vendían o cambiaban a los anteriores y habitantes, que eran los menos peligrosos, debido a que se dedicaban al cultivo del campo.

La isla se transformó en la principal colonia francesa y, posiblemente, la más rica colonia del mundo, gracias a la proliferación de plantaciones de azúcar. El sistema de plantaciones estuvo basado en el uso de gran cantidad de esclavos, que viviendo y trabajando en penosas condiciones morían rápidamente, lo que obligaba a masivas importaciones de nuevos esclavos.

La sociedad se organizaba en diferentes grupos basados en la pureza racial y el poder económico:



- Grandes blancos: este grupo estaba conformado por los funcionarios del gobierno francés y los dueños de las grandes plantaciones. Eran conocidos como la burguesía.

- Pequeños blancos: este grupo estaba formado por blancos que no poseían tierras y que trabajaban en tareas comerciales y artesanales.

- Mulatos y negros libres: un grupo muy heterogéneo.

- Esclavos

El número de esclavos superaba al de blancos en una proporción de más de 20 a 1, y alrededor del 80 % trabajaba en las plantaciones. Su origen era muy variado, ya que pertenecían a muy diversas etnias con costumbres y lenguajes muy diferentes.

6. Marco sismo-tectónico

La zona de estudio se ubica en la región Antillas Mayores orientales, donde destacan principalmente las islas de Cuba y La Española, así como una gran cantidad de islas menores, entre las que se pueden citar las Islas Vírgenes, Barbados o Dominica (Figura 3). Tanto las Antillas Mayores como las Antillas Menores forman parte del Gran Arco del Caribe (Mann, 1999), que es un elemento fisiográfico y tectónico de primer orden que forma parte de la Placa Caribe (Figura 4). Para abordar el marco tectónico en el que se circunscribe la zona de estudio, en este apartado se presenta una descripción de la Placa Caribe.



Figura 3. Localización de las Antillas. Fuente: Google Earth

Dentro del grupo de grandes placas litosféricas presentes en la región, la placa Caribe es una de las de menor superficie (4.000.000 km²). Se sitúa aproximadamente entre las longitudes de 60°W y 90°W y entre las latitudes de 10°N y 20°N. Presenta una forma casi rectangular y se extiende desde Centroamérica, en su límite occidental hasta las Antillas Menores, en su límite oriental, y desde el Sur de Cuba hasta el Norte de Sudamérica (Figura 4). Interacciona con cuatro grandes placas rígidas: la placa Norteamericana en los límites N y NE, la placa Sudamericana en los límites S y SE, la placa de Cocos en el límite O y la placa de Nazca en el límite SO.



Figura 4. Placas tectónicas. Fuente: <http://ciclosolar24.blogspot.com.es>

Límites de la Placa Caribe

Los principales límites de la Placa Caribe (Figura 5), están definidos por la mayor concentración de terremotos en su periferia, por la zona de rift activo en el Surco de las Caimán y por los procesos de vulcanismo activo en sus límites oriental (arco volcánico de las Antillas Menores) y occidental (zonas volcánicas de Centroamérica) (Dolan y Mann, 1998).

Los datos geológicos, geofísicos y geodésicos indican que la placa Caribe se está moviendo principalmente hacia el E en relación a las placas Norteamericana y Sudamericana (Figura 4). A partir de velocidades derivadas de GPS, la placa Caribe se mueve con respecto a la Norteamericana a 18-20 mm/a y con azimuth medio 70° (Mann et al., 2002). Con respecto a la placa Sudamericana, se mueve en la mayor parte del límite a 20 mm/año y con azimuth medio muy variable a lo largo del límite (90°-68°) (Weber et al., 2001). Las tasas de movimiento que predice el modelo geodésico NUVEL-1A para las placas de Cocos y Nazca, con respecto a la placa del Caribe, están entre 59-74 mm/año en sentido NE-E. (DeMets et al., 1994).

Los principales límites de la placa Caribe los podemos clasificar en:

- Límites transcurrentes: constituidos principalmente por desgarres laterales izquierdos conjugados con zonas de transpresión (Isla de Jamaica) y transtensión (Surco de las Caimán), a lo largo del borde N (límite entre las placas del Caribe y

Norteamericana) y desgarres lateral derechos junto con zonas transpresivas, a lo largo del borde S (límite entre las placas del Caribe y Sudamericana) (Granja, 2008).

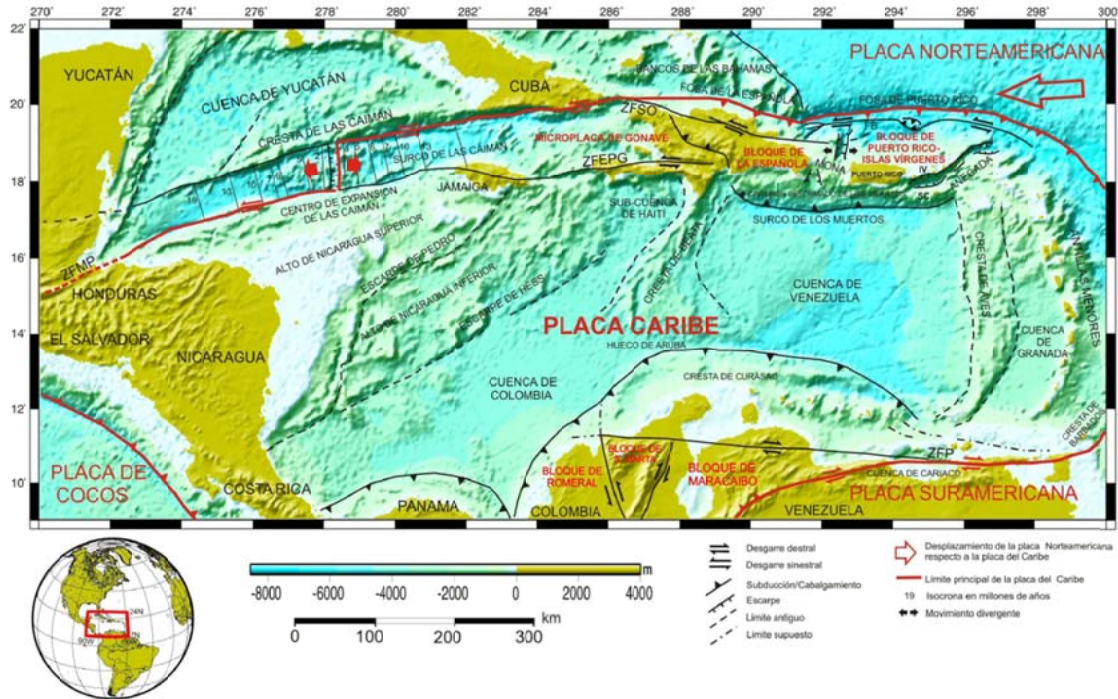


Figura 5. Marco tectónico de la placa Caribe. Extraído de Granja (2008).

- **Límites convergentes:** definidos por los procesos de subducción de la litosfera oceánica Atlántica que se está consumiendo a lo largo del límite oriental de la placa del Caribe. En esta clasificación entraría el sector N-NE de La Española, donde se produce una convergencia oblicua que ha resultado en una colisión (Dolan y Mann, 1998; Pérez-Estaún et al., 2007).
- **Límites divergentes:** muy localizados y de menor entidad, asociados principalmente a la zona extensional en el Surco de las Caimán (Rosencrantz et al., 1988; Ten Brink et al., 2002).

Tanto el límite N como el S presentan un patrón de deformación compartimentada que se resuelve mediante la acomodación a favor de desgarres y cabalgamientos, con menor presencia de fallas normales. Esta compartimentación ha dado lugar a la formación de microplacas y bloques corticales.

Los estudios sismológicos realizados en la zona del Caribe muestran que los terremotos de magnitud mayor de 4.5 tienen lugar más frecuentemente en contextos tectónicos de subducción: las Antillas Menores y Centroamérica. Las placas litosféricas alcanzan en estas regiones los 250 Km de profundidad. Estos grandes terremotos son menos frecuentes en límites transcurrentes, como al N y S de la Placa Caribe (Mann et al., 1999).

Fallas tectónicas

Las fallas activas más estudiadas hasta la fecha son la falla Septentrional, al norte de la isla de La Española -especialmente en su parte de República Dominicana- (Prentice et al., 2003), la de Enriquillo, al sur (Calais et al., 2002), y la falla inversa de Matheux-Neiba, en el interior de Haití -ésta última en menor medida- (Mann et al., 1984 y Pubellier et al., 2000). En la Figura 6 se muestran estas fallas.

Las zonas de subducción alrededor de La Española también son bastante conocidas (Granja, 2008), sin embargo están fuera del objetivo de este TFM, ya que los escenarios sísmicos que se han definido para el cálculo determinista de la peligrosidad se han asociado a fallas cercanas a la ciudad de estudio, Puerto Príncipe (Enriquillo y Matheux-Neiba).

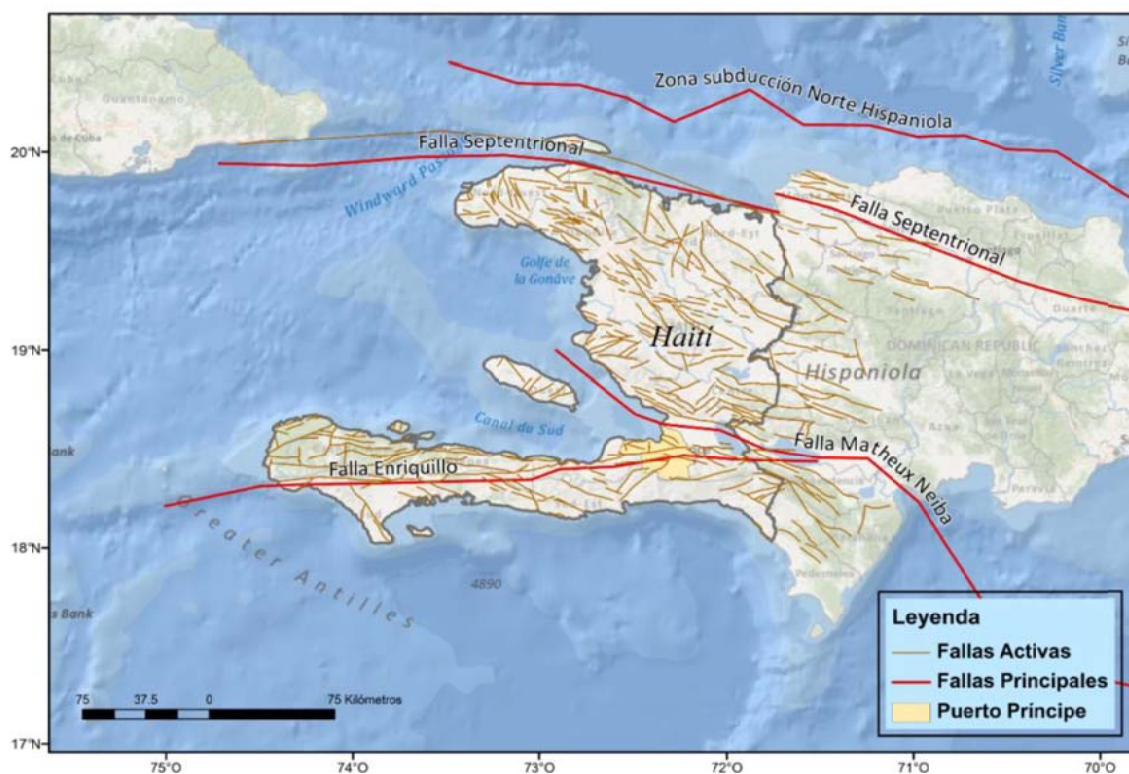


Figura 6. Fallas activas localizadas en la isla de La Española.

– La Falla de Enriquillo

La Falla de Enriquillo es una falla transcurrente, que se localiza al sur de la isla de La Española. La falla recibe su nombre por el Lago Enriquillo en la República Dominicana, donde dicha falla tiene su origen, y se extiende a través de la parte sur de La Española sobre el Mar Caribe hasta la región del Río Plantain Garden, en Jamaica. Comparte aproximadamente la mitad del movimiento relativo entre la placa de América del Norte y las placas tectónicas del Caribe con la falla Septentrional Oriente, que corre a lo largo del



lado norte de La Española. Ambas fallas se unen al oeste de la Fosa de las Caimán. La falla se mueve con una velocidad de aproximadamente 9 mm/año (Calais et al., 2002)

En un principio se pensó que la falla responsable del evento de Enero de 2010 debía ser la falla de Enriquillo, que había acumulado energía elástica suficiente como para generar un terremoto de tales características (Manaker et al., 2008). Sin embargo, tanto las observaciones de campo (Prentice et al., 2010), como los modelos de deslizamiento obtenidos a partir de datos telesísmicos, GPS e InSAR (Calais et al., 2010, Hayes et al., 2010) muestran un tipo de rotura diferente al esperado si el sismo hubiera ocurrido en la falla de Enriquillo. Todo ello hace pensar que en realidad no fue la falla de Enriquillo la responsable del destructivo terremoto, sino una falla con deslizamiento oblicuo, inverso-desgarre, con buzamiento al norte, asociada quizás al cinturón de deformación compresiva situado al norte de la falla de Enriquillo.

– La Falla Septentrional

La Falla Septentrional está formada por diferentes tramos activos e inactivos con movimientos transcurrentes izquierdos. Según Calais et al. (2002), las mediciones GPS realizadas muestran que la falla acumula tensión que se traduce en un movimiento de 12,8 mm/año. Los ramales activos están definidos por la Zona Septentrional de Falla (ZSF) y pueden identificarse como una estructura continua que se origina desde la Baja Samaná, en el área oriental del Valle del Cibao, hasta los alrededores de la Ciudad de Guayubin, en el Valle del Cibao Occidental. Los ramales inactivos comprenden dos fallas conocidas como Villa Vázquez y Monte Cristi. El área Central de ZSF forma un escarpe rectilíneo y continuo que origina sedimentos del Cuaternario Superior. Estudios sismológicos regionales en el Valle del Cibao muestran que el rastro de la falla activa es simplemente la manifestación superficial de muchas fallas subverticales, que deforman los sedimentos del Neógeno Superior de la Cuenca.

– La falla Matheux-Neiba

La falla de Matheux-Neiba pertenece al sistema de fallas inversas del interior de Haití. Se sabe poco sobre la actividad sísmica de esta falla. Aunque las mediciones GPS registradas en dicha falla no establecen un movimiento significativo a lo largo de la traza de la falla, la morfología en el sector occidental de la falla Matheux sugiere que es una falla activa. Se le asigna una velocidad de 1 mm/año, teniendo en cuenta la incertidumbre de los resultados dados por el GPS (Calais et al., 2002)

Cinemática Geodésica. Sistemas de Posicionamiento Global

Esta zona ha sido muy estudiada desde el punto de vista geodésico. Los datos de GPS se han registrado desde el año 1986 hasta el 2007 (Mann et al., 2002, 2005; Calais et al., 2002, 2010) y la red de estaciones de registro se ha mejorado hasta tener una buena distribución y cobertura (Figura 7).

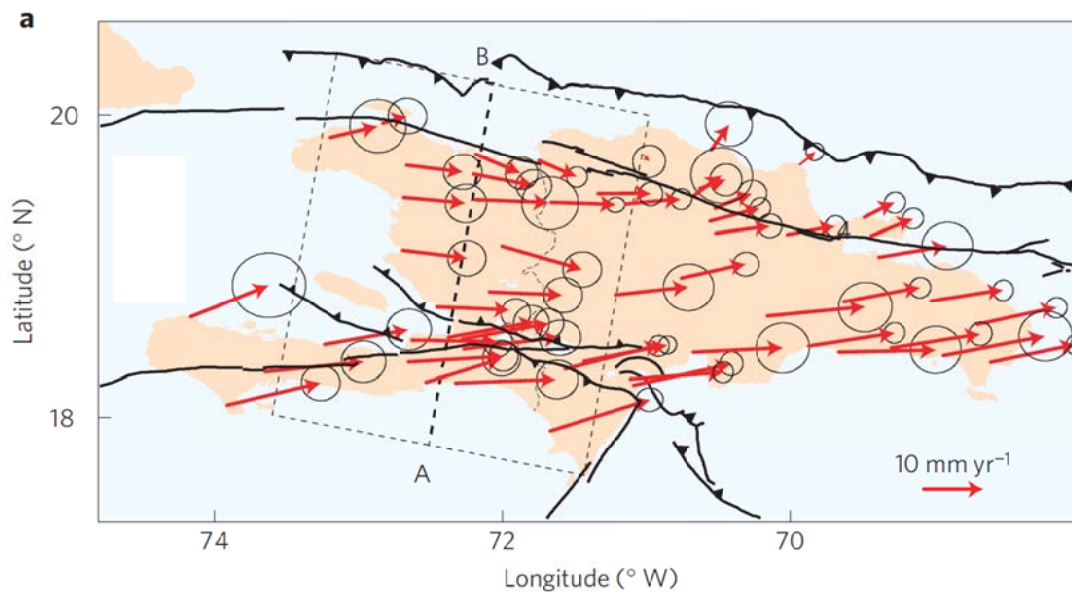


Figura 7. Mapa de velocidades GPS considerando la placa Norteamericana fija (Calais et al., 2010)

Los datos geodésicos han aportado mucha información sobre la cinemática actual y la neotectónica de la zona. Considerando fija la placa Norteamericana, el interior rígido de la placa del Caribe se mueve en dirección media de 70°, alcanzando en algunos puntos velocidades de hasta 20mm/año (Figura 7).

La Española sufre un retraso en su desplazamiento hacia el E con respecto a la placa del Caribe, probablemente debido a la colisión de los Bancos de las Bahamas con el NE de la isla (Granja, 2008). La parte central y septentrional de La Española dan variaciones significativas, tanto en azimut como en tasa de movimiento. De N a S aumenta la tasa de movimiento y aumenta la componente de dirección E, es decir, los vectores sufren un aumento en su módulo y su orientación varía hacia el E (Figura 7).

Sismicidad

Haití tiene una larga historia de grandes terremotos anteriores al de enero de 2010 (Scherer, 1912; Kelleher et al., 1973; McCann, 2006; Ali et al., 2008). En la zona sur, alrededor de Puerto Príncipe, se produjeron tres sismos destructores durante el siglo XVIII: el de 1701 destruyó la ciudad de Léogâne; el de noviembre de 1751 causó daño severo en la capital y se atribuye a la falla de Enriquillo; el de junio de 1770 también fue destructivo y se produjo al oeste de Puerto Príncipe. A estos dos últimos, McCann (2006) les asignó una Mw 7,5 basándose en informes de intensidad.

En el siglo XIX también se han registrado grandes terremotos: en 1860 ocurrió otro evento al oeste de la capital asociado a la falla de Enriquillo; en el norte, la falla Septentrional rompió en 1842 y 1887 dando lugar a dos seísmos que arrasaron ciudades como Cabo Haitiano o Port de Paiz, para los que McCann (2006) estimó una Mw 8,0 y 7,8, respectivamente.

En la Figura 8 se muestra el catálogo sísmico elaborado en el proyecto Sismo-Haití para el cálculo de la peligrosidad a escala regional. Se compone de casi 1800 eventos entre históricos e instrumentales, recopilados de unas 20 agencias de todo el mundo. El catálogo comprende desde 1560 hasta 2011 y las magnitudes del catálogo varían desde 4,0 hasta 8,0.

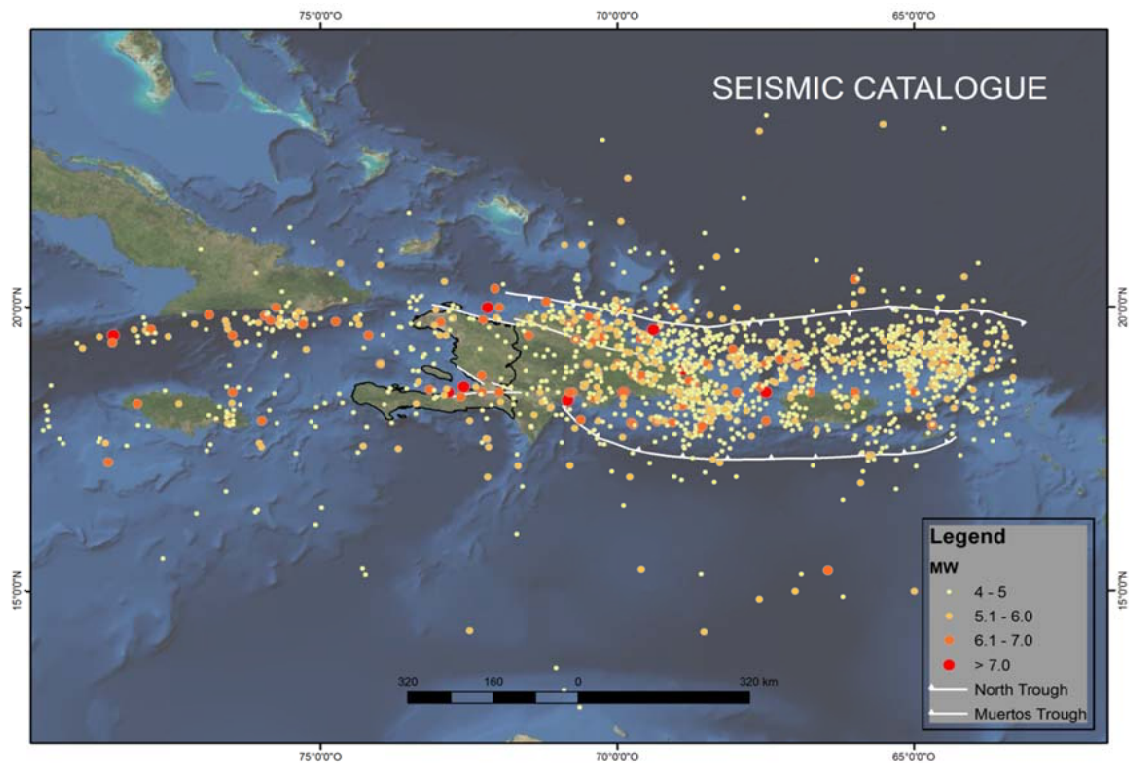


Figura 8. Catálogo sísmico elaborado en el proyecto Sismo-Haiti.

Como se puede apreciar en la Figura 8, la sismicidad es más abundante al este de La Española, donde se localizan las zonas de subducción, aunque las magnitudes predominantes son pequeñas (Mw entre 4 y 5). En la parte haitiana, la sismicidad se distribuye principalmente a lo largo de las estructuras tectónicas principales, continuando esta alineación hasta Jamaica y el sur de Cuba. Los terremotos grandes (con Mw a partir de 7) se localizan en los bordes norte y sur del país, mientras que en el centro se puede apreciar una ausencia de sismicidad. Esto puede deberse a una falta de registros, pues Haití no ha tenido una red sísmica hasta después el terremoto de enero de 2010 (y la que tiene actualmente se compone de unas pocas estaciones), por lo que es posible que las agencias consultadas no hayan registrado todos los eventos ocurridos.

7. El papel de los sistemas de información geográfica en la gestión de los riesgos naturales

Las pérdidas por riesgos naturales están aumentando en los últimos años (Figura 9), lo que podría ser explicado por un incremento de la exposición y la vulnerabilidad. Y es que es un hecho que la población mundial está creciendo, generándose concentraciones de población en áreas urbanas, en muchos países de forma descontrolada. Esto da lugar a ciudades más complejas cuya gestión se hace más difícil y costosa. Por otro lado, cada vez estamos más acostumbrados a poder decidir dónde vivir, trabajar o viajar, y los destinos preferidos suelen ser lugares como líneas costeras, ríos o laderas de montaña, lugares especialmente peligrosos cuando se trata de riesgos naturales. A esto habría que añadirle que los bienes expuestos cada vez son de mayor valor. Por último, la intervención del hombre en el medioambiente (deforestación, contaminación, construcción sin controles, etc.) también es una causa del incremento de la vulnerabilidad.

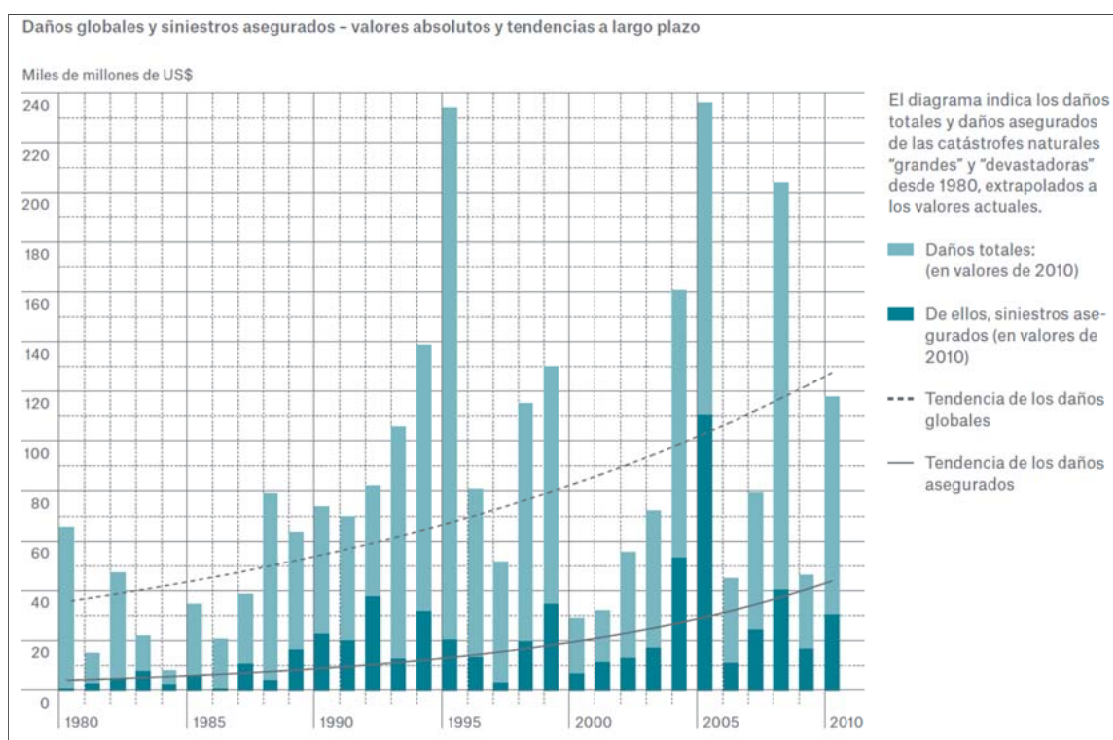


Figura 9. Pérdidas por riesgos naturales en los últimos años (Munich Re 2010)

Esta tendencia de crecimiento ha hecho que los estudios de riesgos naturales alcancen una importancia significativa en las últimas décadas, y como consecuencia, ha aumentado la demanda de información geográfica relacionada con dichos estudios: modelos digitales del terreno que representen las características de la topografía, productos derivados de ellos (como mapas de pendientes u orientaciones), mapas geológicos que aporten información acerca de los tipos de suelos y su comportamiento geotécnico, mapas de fallas



activas y otras estructuras sismogénicas, mapas de usos del suelo, mapas hidrológicos, imágenes de satélite, fotografías aéreas, nubes de puntos LiDAR, límites administrativos, información relacionada con la climatología (como mapas de isotermas o isoyetas), etc.

Las mejores herramientas para gestionar toda esta información son los sistemas de información geográfica, dado su potencial para combinar un gran volumen de datos de diferente naturaleza. Mediante los SIG se crea un marco de referencia común a todos los datos que se usan en un estudio, que se integran y se estructuran de forma ordenada. La homogeneización de formatos, sistemas de referencia, resolución y extensión de los datos resulta una tarea realmente sencilla y cómoda cuando se realiza con un SIG. Además, son innumerables los geoprocursos que permiten llevar a cabo, tanto de análisis espacial -ráster y vectorial, 2D y 3D- como de análisis estadístico y análisis de redes. Asimismo, un SIG permite explotar bases de datos creando la conexión adecuada e incluso manejar datos con componente temporal (x, y, z, t). Con todo ello es posible realizar operaciones muy útiles en el desarrollo de los estudios de riesgos naturales, además de visualizar los resultados en cada fase de cálculo, lo que facilita especialmente la interpretación y la toma de decisiones.

Como consecuencia de todo lo anterior, en la última década, los estudios de riesgo sísmico haciendo uso de estas técnicas se han incrementado notablemente. En España se tienen los ejemplos de SISMICAT en 2002 (DOGC, 2003), RISMUR en 2006 (Benito et al, 2008) y SISMOSAN en 2008 (Benito et al, 2010). Interesante es el trabajo de Lantada et al. (2009), que han comparado el riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona calculado por dos métodos (Índice de Vulnerabilidad y Capacidad-Demanda), donde destacan el uso de un SIG en el que han integrado, analizado y representado una gran cantidad de información sobre las características de las viviendas consideradas en su estudio.

En otras regiones del mundo, cabe citar el trabajo de Sarris et al. (2010), que han calculado la vulnerabilidad y el riesgo sísmico en una ciudad de la isla de Creta utilizando una herramienta basada en SIG que ellos mismos han desarrollado para modelizar las características estructurales y geomorfológicas de la región de su estudio. Ding et al. (2011) presentaron en el *Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS), un sistema también basado en SIG para estimar escenarios de riesgo sísmico en Asia, el CERES (Catastrophe Earthquake Risk Estimation System), en el que la base de datos con toda la información necesaria para las simulaciones está ya incorporada. En la *American Geophysical Union Fall Meeting 2011*, Rukstales et al. (2011) presentaron una mejora al cálculo de los escenarios de riesgo sísmico en EE.UU. que realizan utilizando la base de datos y metodología del proyecto de cálculo de la peligrosidad del *United States Geological Survey* (USGS). La mejora del método consiste en refinar la estimación de la amplificación por efecto local utilizando el parámetro Vs30 (velocidad de cizalla de la onda sísmica en los primeros 30 m de corteza). Aseguran que el uso del SIG les facilita enormemente los cálculos, ya que han de introducir una gran cantidad de parámetros (además de la Vs30, todos lo que caracterizan de la fuente y todos los modelos de atenuación que utilizan, más los pesos del árbol lógico), y sobre todo las comparaciones y análisis de resultados. Chrysostomou et al. (2010) resaltan la importancia de combinar el uso de imágenes de



satélite con el SIG en la estimación del riesgo sísmico en los cascos históricos de las ciudades y lo han aplicado en Paphos, una ciudad de Chipre. Además, han realizado con el SIG un modelado 3D de la ciudad utilizando las alturas de los edificios y ortofotos, que serán de gran ayuda en la estimación del riesgo en ciudad de estudio dado que es una fuente de información muy valiosa para la clasificación de la vulnerabilidad. El uso de las imágenes de satélite y otras técnicas de teledetección es muy habitual en análisis post-evento en los que se trata de evaluar los daños causados por un fenómeno natural (huracanes, tornados, tsunamis...); no obstante, en los últimos años, se están empezando a utilizar en los estudios de riesgo dirigidos a acciones pre-evento, es decir, en estudios cuyo último fin es desarrollar acciones de prevención y planificación de la gestión de la emergencia. Otras muestras de ello son los trabajos de Sahar et al. (2010) y Wieland et al (2012). Los primeros han desarrollado algoritmos para extraer los contornos de edificios a partir de imágenes de satélite y otros datos vectoriales en un SIG facilitando asombrosamente la tarea de la estimación de la vulnerabilidad; los segundos han utilizado imágenes de satélite de diferentes resoluciones para obtener una clasificación de tipologías constructivas de la ciudad de Bishkek, Kirgizstan (yendo progresivamente de menor a mayor detalle en las imágenes) y han completado esa clasificación analizando fotografías 360°, todo ello asistido por un SIG.

7.1. Implementación del sistema de información geográfica de proyecto

Con el fin de dar apoyo a la ejecución de este TFM, se ha implementado el SIG Sismo-Haití. El primer paso ha sido recopilar toda la información geográfica posible del área de Puerto Príncipe. El país carece de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) oficial a la que poder recurrir, pero afortunadamente, a diferencia de lo que ocurre en la mayoría de los casos, esta tarea no ha resultado nada complicada porque tras el sismo de enero de 2010 se publicó una gran cantidad de información de muy diversa naturaleza en internet. Se han podido recopilar informes, imágenes de satélite de alta resolución (GeoEye de 15cm), capas de infraestructuras y de servicios urbanos, red de comunicaciones, límites administrativos, curvas de nivel, etc.

Tras descargar toda esa información, organizarla por temas y subirla a la plataforma que se ha creado a modo de repositorio donde almacenar e intercambiar información con todos los miembros del equipo de trabajo, se ha seleccionado la que sería de utilidad para las distintas fases de este estudio y se ha incorporado al SIG Sismo-Haití. La herramienta de trabajo ha sido ArcGis 10 y como sistema de referencia se ha adoptado WGS-84, siguiendo las recomendaciones del Centro Nacional de Información Geoespacial (CNIGS) de Haití.

La información geográfica utilizada en el estudio ha sido clasificada en *geodatabases* personales en ArcMap. La geodatabase (ArcGis Resource Center) es la estructura de almacenamiento de datos nativa de ArcGIS. Es un contenedor de datos espaciales y atributos que permite al usuario almacenar diferentes tipos de datos SIG dentro de su estructura (entidades vectoriales de tipo puntual, lineal y superficial, ráster de

elevaciones, imágenes, tablas...). Esta estructura se implementa en un sistema relacional de base de datos (RDBMS) o como un sistema de archivos. Este modelo de datos, junto con las capacidades de modelado geoespacial y el carácter escalable de su arquitectura, hacen de la geodatabase un sistema de almacenamiento que habilita el ensamblado de sistemas de información geográfica inteligentes que pueden ser adaptados para diferentes aplicaciones.

A continuación se describe por bloques (Figura 36) la información geográfica que contiene el SIG Sismo-Haití:

1. Exposición.

- Para este bloque, la información geográfica más relevante estaba almacenada en la base de datos proporcionada por el Ministerio de Obras Públicas de Haití (MOP). Esta base de datos contenía información sobre los **edificios de Puerto Príncipe**, hasta un total de 86.822 registros. Entre todos los campos, los que se han utilizado en este estudio han sido los materiales de paredes y techo, uso, superficie, número de plantas, pendiente del emplazamiento, localización y grado de daño causado por el terremoto de 2010. Con ella, ha sido posible realizar la clasificación de tipologías constructivas de la ciudad, como se explica en el apartado 9.1, y estudiar el posible efecto local. La base de datos estaba en formato Excel, y se ha importado a una *geodatabase* personal del SIG Sismo-Haití. La localización de cada edificio venía dada por un par de coordenadas geográficas en WGS-84, por tanto, los edificios de Puerto Príncipe están representados en el SIG por una capa de entidades puntuales.
- Se han utilizado también los 36 **distritos** de la ciudad para dar un contexto geográfico en el que situar los edificios y estudiar su distribución espacial. Además, estos distritos han sido las unidades de representación (geounidades) de los resultados de riesgo, pues son las unidades administrativas en que se divide la ciudad y en base a las cuales se realiza su gestión. La capa de entidades poligonales con los distritos fue proporcionada por el CNIGS en formato *shapefile*. Éste se ha incorporado a la *geodatabase* personal que contiene otros límites administrativos descargados de la página web del MINUSTAH (MINUSTAH, 2010): fronteras nacionales de la isla de La Española, así como las regiones y ciudades de Haití.

2. Amenaza.

- Para esta fase del estudio se ha necesitado un **modelo digital del terreno (MDT)**, que se ha creado a partir de las curvas de nivel de ASTER-GDEM (ASTER, 2010) con equidistancia 20m. En primer lugar se generó un TIN (Triangle Irregular Network) utilizando los vértices de las curvas de nivel como puntos de cota, los ríos de una red hidrográfica que se había publicado en la página web del MINUSTAH (MINUSTAH, 2010) como líneas de ruptura (*breaklines*) y algunos lagos también obtenidos de la misma web, como polígonos de sustitución (aunque finalmente los lagos se



encontraban fuera del polígono que define la zona de estudio, el cual se utilizó como polígono de recorte). Este TIN se pasó a ráster con tamaño de celda 20m, que es el MDT que se ha utilizado para el estudio.

- Asimismo, se ha incluido un **mapa geológico** proporcionado por el Buró de Minas y Energía de Haití. Se trata de un mapa realizado por el equipo de Cox et al. (2011) tras el terremoto de enero de 2010. El mapa se ha georreferenciado con ayuda de las coordenadas del marco y se ha digitalizado. La capa de entidades poligonales resultante se ha incorporado a la *geodatabase* personal donde se almacena información geológica. A la tabla de atributos de los polígonos que conforman las estructuras geológicas se les ha añadido un campo que recoge su valor de **Vs30** correspondiente (velocidad de las ondas de cizalla en los 30 primeros metros de corteza); este parámetro se ha tomado como indicador de la amplificación del movimiento del suelo por la geología (Dr. M. Navarro, comunicación personal), de forma que los valores bajos de Vs30 amplifican más el movimiento que los altos. Durante la campaña de campo de dos semanas de duración que el grupo de trabajo realizó en Puerto Príncipe en junio de 2011, el equipo especialista en efecto local tuvo la oportunidad de hacer medidas en el Palacio Presidencial para obtener el valor de Vs30 en un punto dentro de su recinto. El valor que obtuvieron fue del mismo orden que el obtenido por Cox et al. (2011) en esa zona, lo que permitió en cierto modo validar los datos que se estaban adoptando.
- Por último, se ha incluido en el SIG una capa vectorial de **fallas activas** (entidades lineales) que había publicado el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) en su página web (www.usgs.gov). El equipo de trabajo ha podido completar ese mapa añadiendo todas las fallas menores (de menor potencial sismogénico) de las que tenían información, con ayuda del MDT, y se han incorporado a la *geodatabase* personal de geología.

3. Riesgo.

- En este bloque se han incluido los resultados de SELENA v 5.0. (Molina et al., 2010; Molina et al., 2007; Lang et al., 2008), programa de cálculo utilizado para hacer todos los cálculos de riesgo. Se trata de tablas cuyos campos recogen el número de edificios de cada tipología constructiva que se estima alcancen cada grado de **daño**. Estos datos están dados por cada geounidad, por tanto, las tablas tienen 36 registros. Para realizar los mapas, cada tabla de resultados se ha unido a la de distritos por el campo que almacena su nombre y se ha representado aplicando la técnica cartográfica más adecuada según su naturaleza. La cartografía puede consultarse en el apartado 9.4.

8. Análisis de daños causados por el terremoto de enero de 2010

Días después del terremoto de enero de 2010, fueron muchos los investigadores que visitaron Haití para hacer una interpretación de los daños y tratar de comprender las causas de los fallos estructurales. En los informes que elaboraron de su visita se recogen sus observaciones, interpretaciones y lecciones aprendidas que pueden aplicarse tanto en la reconstrucción de las ciudades afectadas en Haití como en otros países de características similares.

Antes de comenzar con el estudio de riesgo sísmico en Puerto Príncipe, objetivo de este TFM, se ha hecho una recopilación y lectura de esos informes con el fin de entender la problemática a tratar y conocer las características estructurales de los edificios de la ciudad, así como sus debilidades, que explicarían los altos porcentajes de daño sufridos. En este apartado se exponen los datos más relevantes extraídos de dichos informes.

En la Figura 10 se recogen las muertes causadas por terremotos desde 1900 en todo el mundo, indicando los eventos más letales. Como puede observarse, el de Haití ha tenido un índice de mortalidad dos veces mayor que cualquier otro de su misma magnitud (Mw 7,0) hasta el momento. Además, se sitúa como el cuarto más catastrófico en términos de víctimas, siendo los tres primeros de magnitudes mayores.

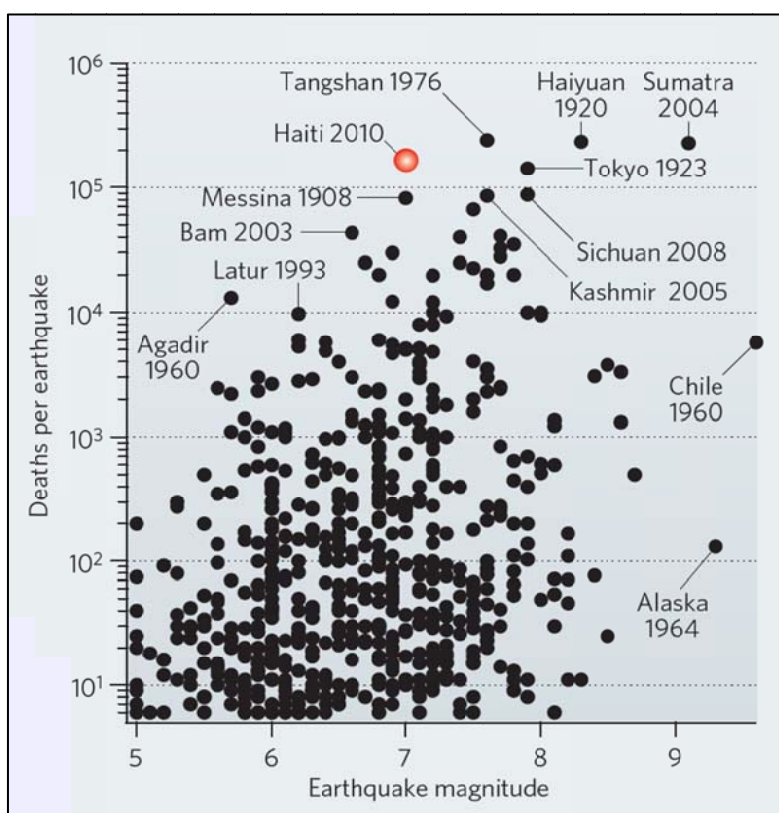


Figura 10. Muertes por terremoto desde 1900 (Bilham, 2010)

Según Bilham (2010), la explicación se encuentra fácilmente sin más que observar las ruinas; éstas desvelan malas prácticas constructivas, como la utilización de acero frágil en los armados, cemento adulterado con sal y otros contaminantes, estribos mal cerrados en las uniones viga-pilar, etc. A esta conclusión llegan también Mix et al. (2011), que lideraron un grupo de reconocimiento dedicado a buscar los fallos estructurales que dieron lugar a los daños observados en Haití. Concluyeron que, en muchos casos, estos fallos se debían a columnas de tamaño incorrecto o incorrectamente reforzadas, materiales deficientes, prácticas de construcción no adecuadas y ausencia de consideraciones antisísmicas en el diseño estructural.

Otra causa de los daños ha podido ser el efecto local. En la Figura 11 se pueden apreciar áreas de graves daños junto a otras de daños moderados, incluso sin daño, aun tratándose de edificios de similares características constructivas. Ello indica que el movimiento sísmico de entrada ha podido ser amplificado por el tipo de suelo (los suelos blandos amplifican la onda sísmica) y/o por la topografía (los relieves prominentes también) presente bajo los edificios que han alcanzado un grado de daño mayor.

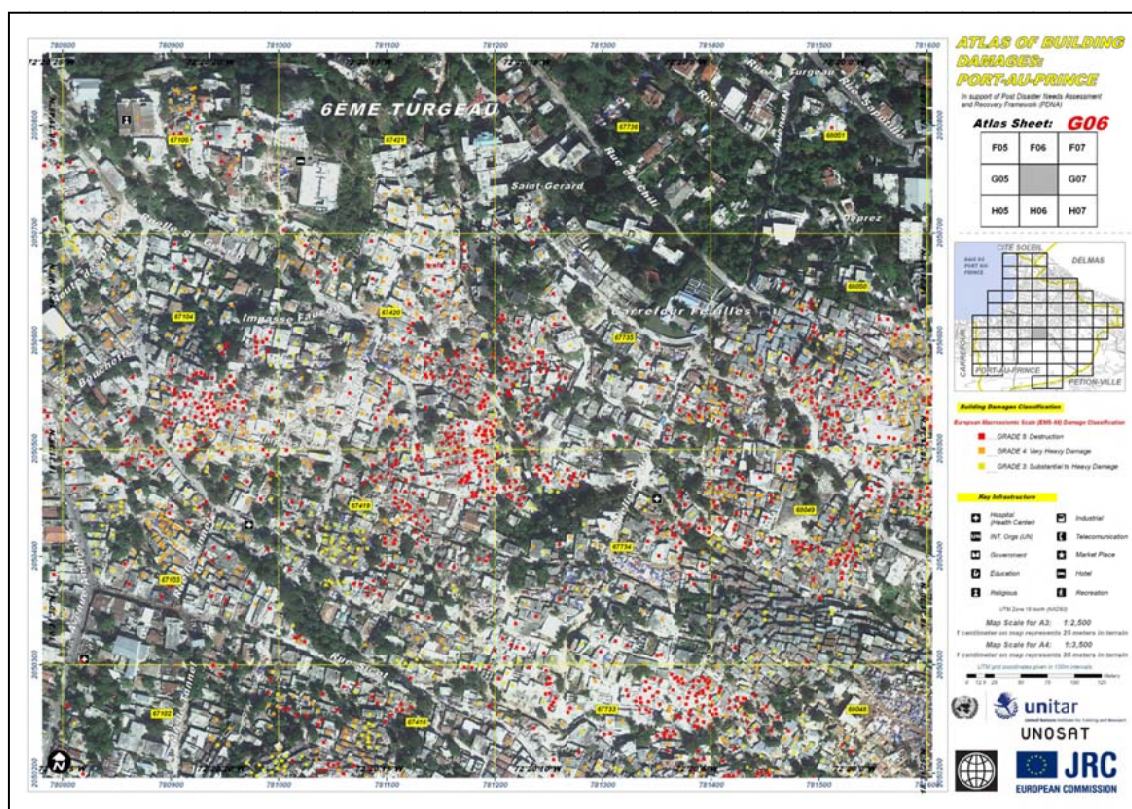


Figura 11. Hoja G06 del atlas de edificios dañados en Puerto Príncipe. Puntos rojos: edificios colapsados; puntos naranjas: edificios con daño severo; puntos amarillos: edificios con daño moderado. Fuente: MINUSTAH

A continuación se analizan con más detalle ambas causas.



8.1. Prácticas de construcción locales como responsables de la alta vulnerabilidad sísmica

Hasta la fecha, no hay código sísmico en Haití (a este respecto, cabe mencionar que la primera parte del proyecto Sismo-Haití ha consistido en la elaboración de un mapa de peligrosidad sísmica a escala nacional que sirva de base para la definición de la primera normativa sismorresistente del país). Dada la tasa de pobreza de Haití, la prioridad del país en su historia reciente ha sido luchar por sacar a sus habitantes de esa situación. Esto, sumado a que hace más de 200 años que no sufren un terremoto severo, le ha llevado a despreocuparse del peligro que entraña vivir en una zona de alta actividad sísmica, a pesar de que Calais (2002) concluyera que en la zona de falla de Enriquillo había deformación acumulada suficiente como para que se produjera un gran terremoto. Esta falta de conciencia del peligro a que está expuesta la población haitiana explica que no sea obligatorio construir siguiendo un código sísmico, ni siquiera se requieran conocimientos de diseño sismorresistente en el currículum de los ingenieros y arquitectos haitianos, ni tampoco inspecciones a los edificios en construcción (Fierro y Perry, 2010). Muy pocos edificios parecen tener un diseño antisísmico. Las consecuencias de esta situación son los elevadísimos daños que se han registrado en el terremoto de 2010, y que se volverán a producir si no tiene lugar un cambio en la mentalidad de la sociedad haitiana.

Para comprender bien el contexto hay que añadir que en Haití domina la autoconstrucción, es decir, la mayoría de los propietarios de las viviendas son también los constructores de las mismas. Una de las razones es la fuerza de la costumbre, pues esto es un hábito local que también se da en otros países en vías de desarrollo, como en América Central. La otra es la falta de medios, ya que la mayoría de la población no puede permitirse contratar a un arquitecto y a un constructor, ni pagar al ayuntamiento un permiso de obras. Marshall et al. (2011) realizaron un estudio de campo tras el terremoto de 2010 y comprobaron cómo los edificios residenciales en Haití están contruidos normalmente por sus propietarios que pueden o no tener las habilidades y recursos para construir una estructura que sea segura ante los terremotos. Indican que muy pocas estructuras se han diseñado por ingenieros profesionales o son inspeccionadas en términos de calidad de la construcción. Esto, además de dar lugar a construcciones deficientes, tiene un efecto colateral que es la falta total de control en catastro y urbanismo.

En la Figura 12 se muestra la tipología constructiva más común en Haití, que se caracteriza por tener marcos estructurales (vigas y pilares) de hormigón armado con paredes de mampostería sin reforzar (Fierro y Perry, 2010). Esta tipología es también muy frecuente en otros países del mundo y, cuando está bien construida siguiendo los criterios del diseño sismorresistente marcados por las normativas, tiene un comportamiento bastante aceptable. Desgraciadamente, en el caso de Haití, los edificios contruidos siguiendo ese modelo tenían marcos débiles, infra-dimensionados, y la mampostería no estaba bien confinada a las vigas y los pilares. El resultado de esta deficiente construcción

ha sido el fallo en el comportamiento de miles de edificios que ha derivado en tan alto daño severo y número de colapsos.



Figura 12. Tipología de mampostería confinada, la construcción más común en Haití

De la observación en campo de los edificios dañados y colapsados se han podido extraer las siguientes conclusiones sobre malas prácticas constructivas:

1. Los estribos que atan las varillas en el armado de los pilares están demasiado distanciados entre sí, como puede verse en la Figura 13. Debería haber al menos dos estribos más entre ellos.



Figura 13. Distancia entre estribos en los pilares (Fierro y Perry, 2010)

Además, se puede ver que están cerrados a 90° en lugar de a 135° como recomiendan las normas y manuales de construcción (Figura 14).

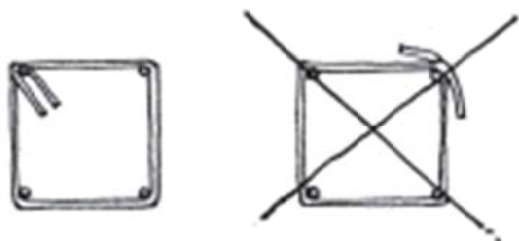


Figura 14. Ángulo de cierre de los atados en pilares. (Blondet, 2005)

2. El hormigón se fabrica generalmente in situ (Figura 15), sin hormigonera, lo que favorece el aporte de partículas contaminantes a la mezcla. Esto empobrece el hormigón quitándole resistencia. En ocasiones, la arena se coge de la playa, que lleva partículas salinas. Éstas afectan a las propiedades no sólo del hormigón, sino también del acero, que se oxida y se vuelve más frágil, reduciendo la ductilidad del elemento estructural que se construya.



Figura 15. Fabricación de hormigón in situ (EERI, 2010)

Las consecuencias de esta mala práctica se han podido observar en los daños causados por el terremoto de 2010, como muestra la Figura 16, donde puede verse el hormigón desmoronado.



Figura 16. Imagen del hormigón desmoronado en un edificio dañado (Eberhard, 2010)

3. Los pilares de la mayoría de los edificios estaban infra-dimensionados (Figura 17). Según pudieron comprobar Fierro y Perry (2010), los pilares solían medir unos 15x30cm, cuando lo recomendado es un mínimo de 25cm, y preferiblemente, 30cm. Por otro lado, en general, las losas eran demasiado gruesas, lo que aumentaba sobre manera la masa de los edificios.



Figura 17. Edificio tipo de pilares esbeltos y losas gruesas (Fierro y Perry, 2010).

La Figura 17 pone de manifiesto la fragilidad de las estructuras así construidas, cuando lo que se busca en diseño sismorresistente es precisamente lo contrario: ductilidad. El destino de estos edificios es generalmente el colapso llamado pan cake (primera planta del edificio de la

Figura 17 y edificio completo en la Figura 18), que se produce cuando las delgadas columnas simplemente no pueden resistir el peso de las losas ante la acción sísmica.



Figura 18. Colapso tipo "pan cake" (Eberhard, 2012)

Este tipo de fallo se ve favorecido cuando en la unión viga-pilar, las losas están atadas en la cara interior de los pilares y no en la exterior (Figura 19). Con ello, en lugar de generarse una rótula plástica en esas uniones que haría resistir al edificio, lo que ocurre es que la losa se comienza a separar de esa unión y con su peso rompe los pilares, haciendo colapsar al edificio (marcado en círculo rojo en las Figura 17 y Figura 20).

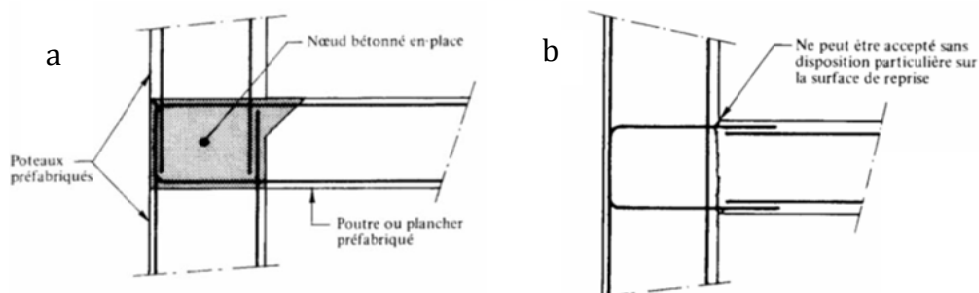


Figura 19. Ilustración del código francés (BAEL 91) sobre cómo realizar las uniones viga-pilar.
a) atado de la losa en la cara exterior del pilar ; b) atado en la cara interior (no permitido)



Figura 20. Imagen de mal funcionamiento de la rótula plástica en la unión viga-pilar (Eberhard, 2010)

4. Las barras de acero del hormigón armado, así como los estribos, eran generalmente más delgados de lo requerido (Figura 16), lo que resta ductilidad al elemento estructural y hace que los estribos se partan con más facilidad. Esto libera al hormigón de su confinamiento, permitiéndole expandirse cuando la vibración es lo suficientemente fuerte, rompiendo de esa manera el pilar o la viga.

En muchas ocasiones, se encontraron barras de acero lisas en lugar de corrugadas (Figura 21) y, habitualmente, estaban torcidas (Figura 22). Aunque el diseño estructural recomienda en determinadas ocasiones deformar las barras antes de colocarlas para favorecer la adherencia del hormigón, éste no es el caso en Haití, pues se aprecia que la ondulación de las barras se debe a que están reutilizadas y por tanto, el acero ya no trabaja igual.



Figura 21. Imagen de barras de acero lisas para el hormigón armado (Eberhard, 2010)



Figura 22. Imagen de barras de acero torcidas en un pilar (Fierro y Perry, 2010)

5. Se localizaron también fallos por cortante en los edificios no colapsados, así como pilares cortos, elementos no permitidos en diseño sismorresistente porque son un punto débil en la estructura. Ambos son síntomas de mal diseño constructivo (Figura 23).
- 6.



Figura 23. Imagen de pilar corto y fallo por cortante en edificio no colapsado (Eberhard, 2010)

7. En la mayoría de los edificios, especialmente en los colapsados, se encontraban elementos de cerramiento sin confinar y poco robustos. En la Figura 24 se puede ver el muro exterior construyéndose después de los pilares sin ningún tipo de armado ni enlace con pilares ni vigas. Además, se observa que la losa de la primera planta se están construyendo con bloques de mortero para ahorrar hormigón. Todo ello hace a la estructura menos robusta y sus elementos se comportarán de forma independiente cuando llegue el movimiento sísmico en lugar de actuar como una única estructura. En efecto, Lang y Marshall (2011),

en su informe de daños tras el sismo de 2010, aseguran que aquellos edificios en los que las paredes se colocaron antes que las columnas (mampostería confinada) tuvieron un mejor comportamiento que el resto.



Figura 24. Edificio en construcción (Eberhard, 2010)

De todas estas observaciones de campo se concluye que las estructuras en Haití no siguen ninguna normativa antisísmica, no hay mucho control ni inspecciones de las construcciones y la gran mayoría de la población tiende a escatimar en gastos a la hora de construir sus viviendas porque la falta de medios prima ante la conciencia del peligro al que están expuestos. Todos estos factores conducen a una alta vulnerabilidad estructural que ha sido la responsable, en gran medida, de la magnitud de la catástrofe vivida en 2010. Esta situación es como un patrón que se repite en todas las ciudades visitadas (Léogâne, Carrefour...) y que parece que no ha cambiado a lo largo de su historia. Además de en 2010, según los registros, varias ciudades de Haití han sido destruidas en otras ocasiones (Puerto Príncipe, en 1751 y 1770; Léogâne en 1701; Cabo Haitiano y Port de Paiz en 1842 y 1887), lo que hace pensar que sólo el reforzamiento de las estructuras existentes y la construcción de las nuevas siguiendo un código sísmico definido en base a las particulares características del país (tipo de construcciones, materias primas, costumbres, sociedad, economía...), podrán evitar los daños severos y los colapsos en el futuro, que son los que principalmente causan las víctimas. Esto, unido a un eficaz plan de emergencias y la formación de la población y de los técnicos locales –ingenieros y arquitectos, principalmente-, son las únicas herramientas para conseguir minimizar el riesgo sísmico en las ciudades de Haití.

8.2. Análisis del posible efecto local durante el sismo de enero de 2010

Rathje et al. (2011) efectuaron también una visita a Puerto Príncipe tras el terremoto de 2010 para evaluar los daños. En su informe indican que parece haber dos patrones de daños. Por un lado, los daños registrados en la zona centro de la ciudad pueden deberse a que ésta está ubicada sobre materiales aluviales del Holoceno, con velocidades medias (V_{s30}) de 350 m/s, lo que hace pensar en un posible efecto local debido a la geología. Sin embargo, otras zonas dañadas se concentran sobre las laderas alrededor del centro de la ciudad, donde hay materiales más antiguos, con V_{s30} mayores. Estos focos de daño parecen estar causados por una combinación de factores, que incluyen amplificación topográfica, alta vulnerabilidad estructural y fallo de laderas con mucha pendiente.

Con el fin de comprobar estas observaciones, en el SIG Sismo-Haití (apartado 7.1), se ha llevado a cabo un análisis de la distribución espacial de los daños y su relación con otras variables: la orografía, la pendiente y el tipo de suelo. La Figura 25 muestra una vista 3D de la distribución de los edificios dañados en la ciudad de Puerto Príncipe, representados con puntos a partir de la base de datos del MOP, sobre la capa de valores de V_{s30} y sobre el relieve, simbolizado por medio de curvas de nivel y sombreado. Se han representado también los distritos con una ligera línea negra para ayudar con la interpretación espacial.

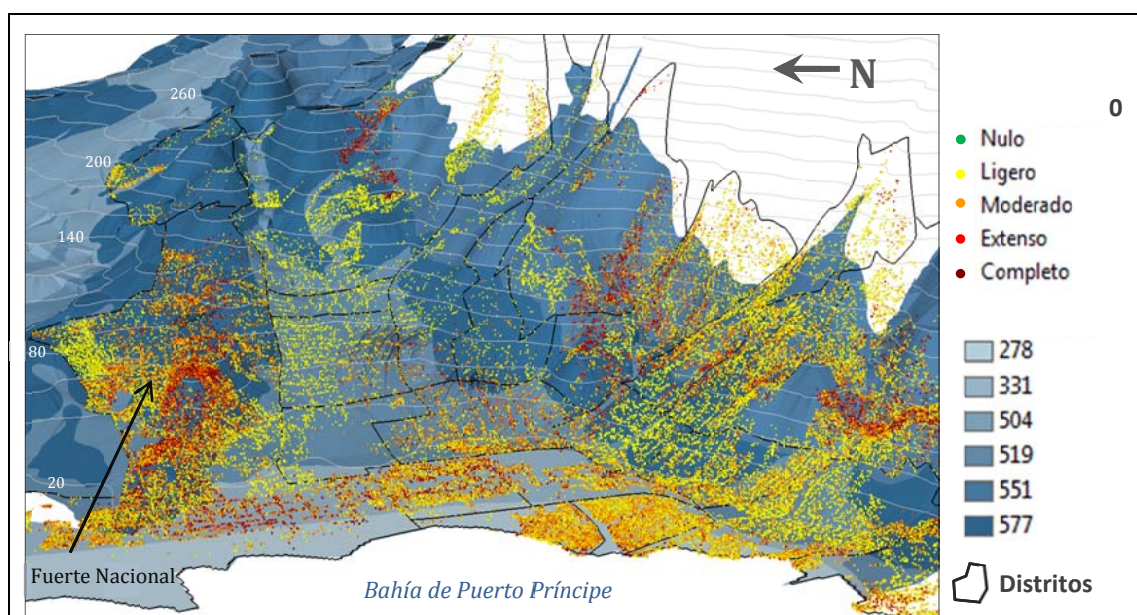


Figura 25. Vista del SIG de proyecto: distribución espacial de los daños causados por el sismo de enero de 2010.

Como puede verse en la Figura 25, los daños más graves (puntos naranjas oscuros y granates) se localizan en el centro de la ciudad y en la zona costera, así como en una franja de las laderas de las montañas del sur y en el Fuerte Nacional (elevación montañosa situada al norte de la ciudad), tal y como observaron Rathje et al. (2011).

Para analizar con más detalle la correlación entre el daño y la orografía, la pendiente y el tipo de suelo, se han realizado en el SIG varias comprobaciones:

1) Daños-orografía

Se ha elegido el Fuerte Nacional como prototipo de área donde el tipo de suelo no variase y la morfología del terreno diera lugar a una convexidad (Figura 26).

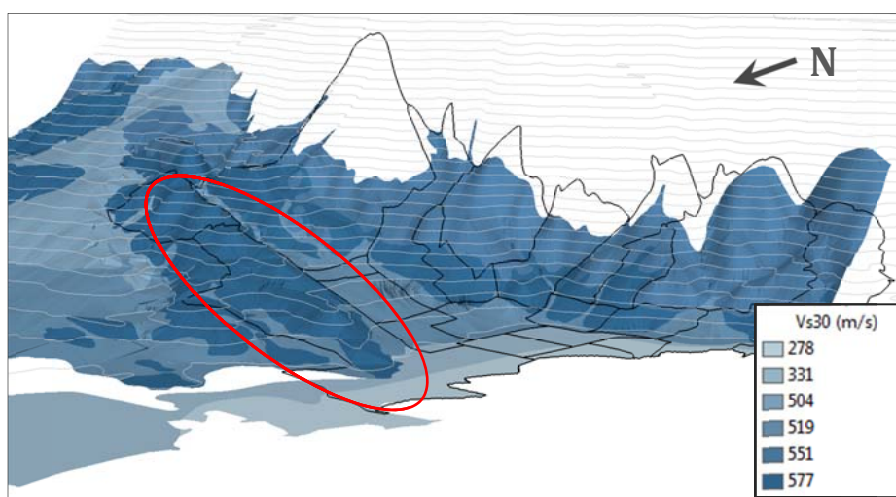


Figura 26. Vista del SIG de proyecto: distribución de Vs30 en Puerto Príncipe

En el SIG, se han seleccionado los edificios que se ubican en este área y se han superpuesto al MDT. Se ha contabilizado el número de edificios que sufrieron daño al menos extenso en el sismo de 2010, y se ha comprobado si ese número de edificios dañados aumenta con la altitud. El estudio se ha realizado por separado para edificios de hormigón armado y de mampostería (tipologías RC-CB y RL-BM, respectivamente. Ver apartado 9.1.1 para más información sobre su descripción), para descartar la resistencia de la estructura como responsable de los daños.

El resultado se muestra en las siguientes figuras. La Figura 27 es una vista del SIG donde se han representado en 3D los edificios dañados y el relieve por medio del MDT y curvas de nivel. Se ha rotulado la cota media de cada intervalo de alturas estudiado. Se puede ver claramente cómo los daños se localizan en la cresta de la elevación, especialmente en la convexidad más pronunciada, el Fuerte Nacional.

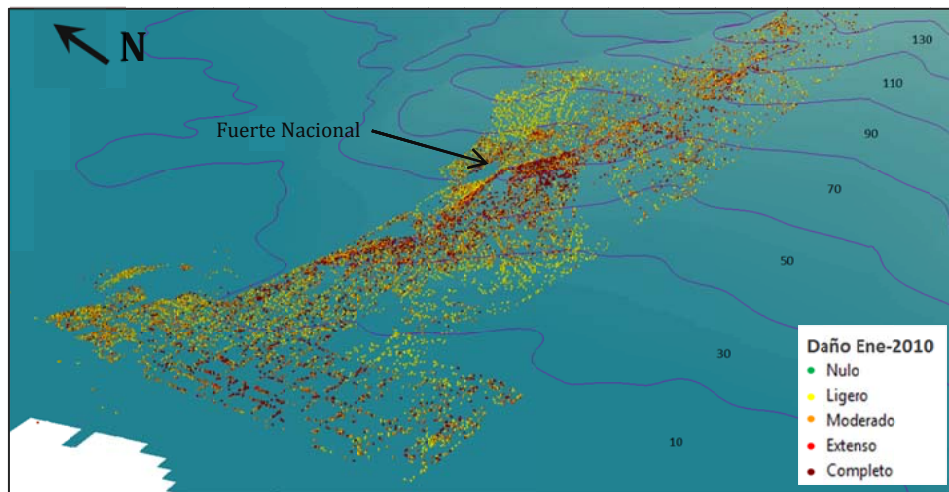


Figura 27. Vista del SIG de proyecto: representación de los daños con el relieve

La Figura 28 es una gráfica donde se ha cuantificado este aumento del daño con la altitud. Se puede ver cómo el porcentaje de edificios de mampostería (tipología RLBM) dañados gravemente con respecto al total de su tipología en cada intervalo de altitud, aumenta especialmente de la cota 50 a la 70, justo donde se localiza el Fuerte Nacional. En el caso de los edificios de hormigón armado (RCCB) se aprecia un patrón de aumento del daño con la altitud, pero más regular.

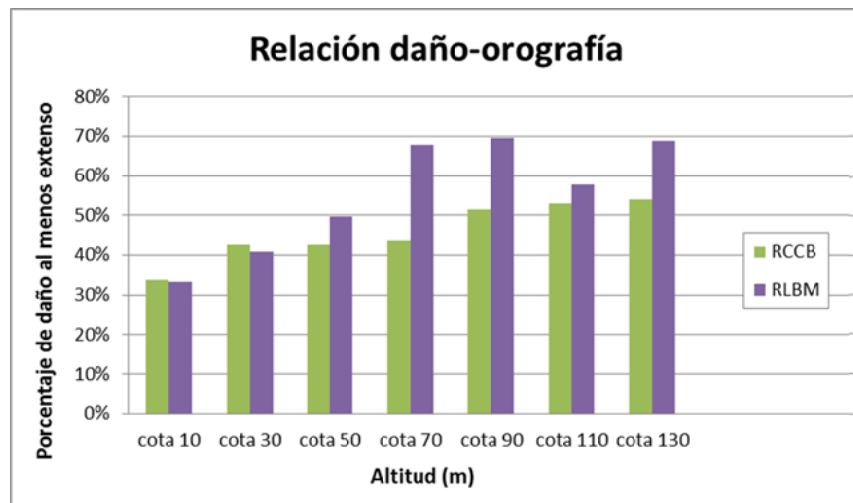


Figura 28. Porcentajes de daño al menos extenso en edificios de hormigón armado (RCCB) y mampostería (RLBM) a distintas altitudes

2) Daños-pendiente

Para realizar esta parte del estudio, se han tomado de la base de datos del MOP los datos de pendiente del emplazamiento de los edificios. Así, en el SIG se han clasificado los edificios según estuvieran en pendiente plana, media o abrupta

(criterio tomado directamente de la base de datos. Ver formularios de toma de datos en las Figura 38 y Figura 39) y se ha cuantificado el número de los que han superado el daño extenso. El resultado se muestra en la Figura 29, donde se puede ver una tendencia al aumento del daño con la pendiente, más clara en los edificios de hormigón que en los de mampostería.

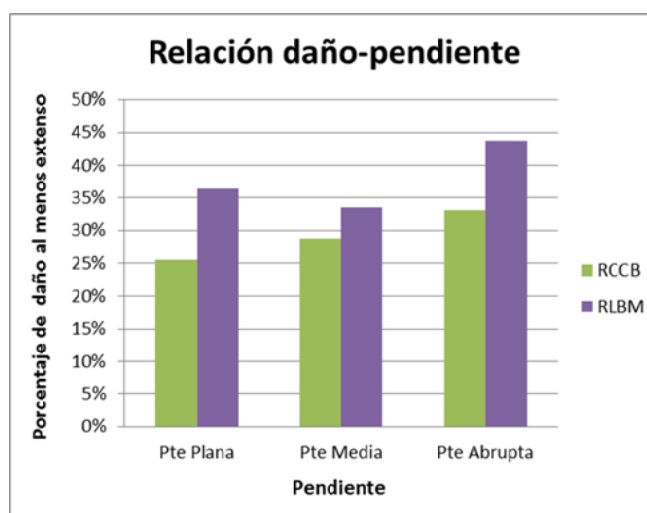


Figura 29. Porcentajes de daño al menos extenso en edificios de hormigón armado (RCCB) y mampostería (RLBM) ubicados en distintas pendientes.

3) Daños-tipo de suelo

En este caso se han utilizado los valores de Vs30 tomados de Cox et al. (2011). Se han seleccionado en el SIG los edificios que se encuentran en el mismo intervalo de altitud (entre 0 y 20 m), para eliminar su influencia en los daños, pero en diferentes tipos de suelo (Figura 30). A continuación, se ha contabilizado el número de edificios de cada tipología que han alcanzado o superado el grado de daño severo y se ha analizado si ese número disminuye al aumentar la Vs30, como se esperaría (por ser suelo más duro, y por tanto, el movimiento del suelo se habría amplificado menos). Dado que las Vs30 de 278m/s y 331m/s corresponden al mismo tipo de suelo –suelo D ($180 \text{ m/s} < Vs30 \leq 360 \text{ m/s}$)- según la clasificación del NEHRP (FEMA, 2001), los suelos en ese rango de velocidades se han unido en este análisis.

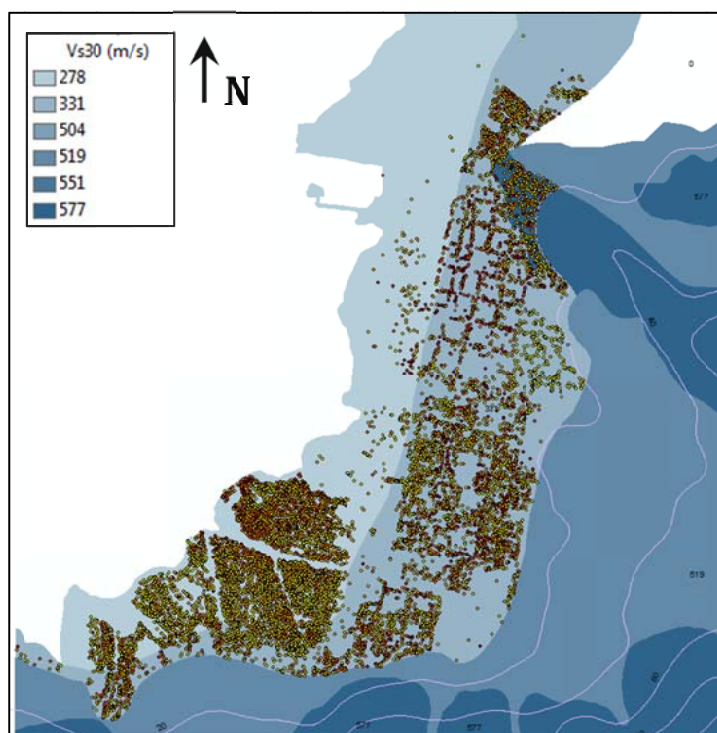


Figura 30. Vista del SIG de proyecto: representación de los daños con la Vs30 en altitud entre 0-20 m.

El resultado se presenta en la Figura 31, y se puede observar cómo ambas tipologías siguen el comportamiento esperado, es decir se dañan menos cuando están ubicados sobre suelo duro.

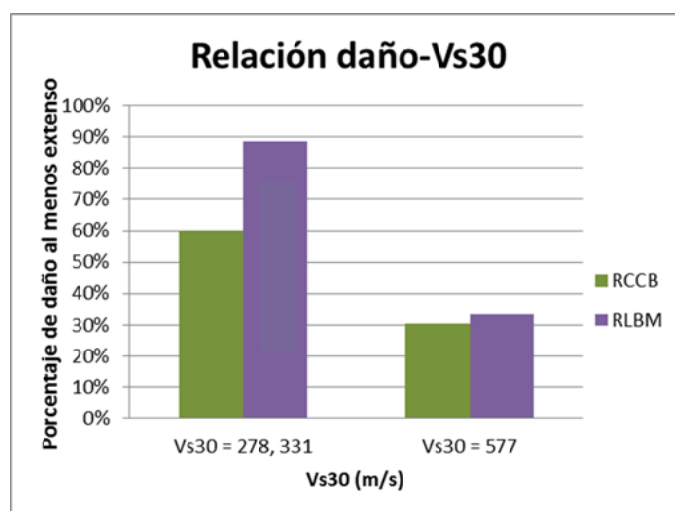


Figura 31. Porcentajes de daño al menos extenso en edificios de hormigón armado (RCCB) y mampostería (RLBM) ubicados en distintos tipos de suelo y altitud de 0-20m

Se ha realizado el mismo estudio, pero con edificios situados a mayor altitud (entre 20 y 40 m), donde comienzan a levantarse las montañas que rodean la ciudad. En

estas zonas, el suelo es tipo C, según el NEHRP (FEMA, 2001), es decir, la V_{s30} tiene valores en el intervalo [360-760] m/s. Curiosamente, se ha encontrado más daño en los suelos de V_{s30} mayor (577 m/s) que en los de V_{s30} menor (519 m/s), donde se habría amplificado algo más el movimiento (Figura 32 y Figura 33).

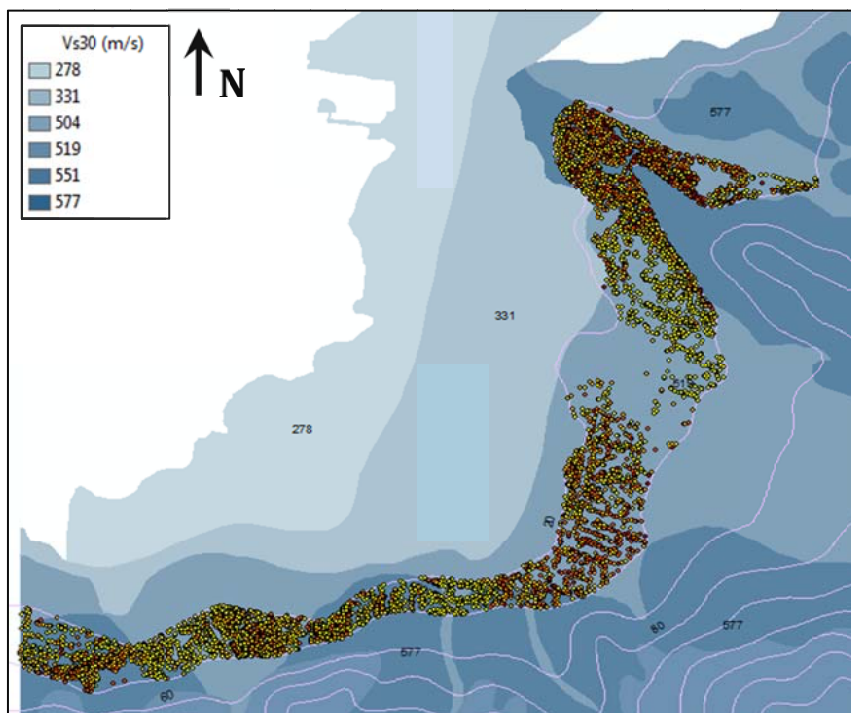


Figura 32. Vista del SIG de proyecto: representación de los daños con la V_{s30} en altitud entre 20-40 m.

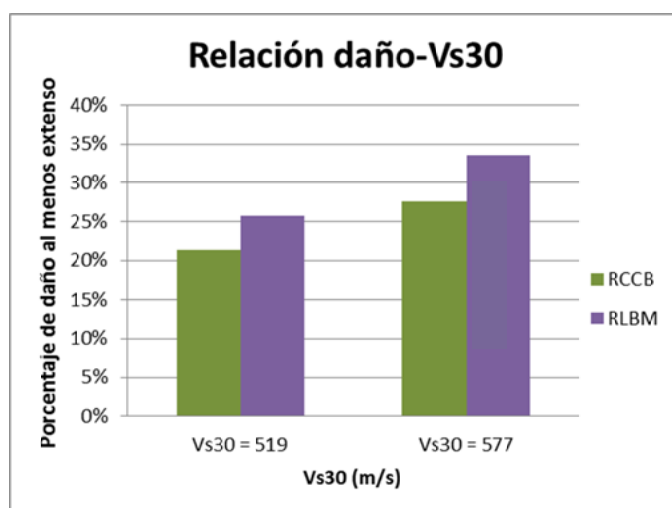


Figura 33. Porcentajes de daño al menos extenso en edificios de hormigón armado (RCCB) y mampostería (RLBM) ubicados en distintos tipos de suelo y altitud de 20-40m

La explicación podría encontrarse en lo que aseguraban Rathje et al. (2011): que esté influyendo también la morfología del terreno y la construcción, ya que en estas zonas de montaña se encuentran débiles construcciones hacinadas en fuertes pendientes (Figura 34).



Figura 34. Vista de Google Earth donde se aprecia cómo empeora la ordenación urbana en el Fuerte Nacional.

Para la ciudad de Puerto Príncipe, con sus características topográficas, geológicas y arquitectónicas, se puede establecer lo siguiente con los resultados obtenidos hasta el momento:

- La orografía influye en los daños, de manera que las construcciones ubicadas en formaciones de morfología convexa son más propensas a sufrir daños, especialmente si están situadas en crestas de montaña.
- Los edificios situados en pendiente tienden a sufrir más daño que los situados en un emplazamiento llano, independientemente del tipo de suelo (aunque en suelos no compactados este efecto sería aun más evidente).
- En general, el daño en los edificios aumenta cuando éstos se localizan en depósitos superficiales blandos (alta V_{s30}), aunque en el caso de Puerto Príncipe, ese patrón se ve alterado por otros factores cuando se analizan zonas de montaña. Estos factores están relacionados con el hecho de construir en pendiente, con la baja calidad de las construcciones, la falta de ordenación urbana, posibles desplazamientos de ladera o roca, etc.

Con todo ello, se ha elaborado una cartografía (Figura 35) en la que se identifican los distritos de la ciudad donde se han localizado los daños más graves y se han podido relacionar con alguno de los efectos mencionados anteriormente. La entidad competente haitiana puede, por tanto, apoyarse en este mapa a la hora de elaborar el Plan General de Ordenación Urbana en el momento de la reconstrucción de Puerto Príncipe. De esta manera, este resultado del TFM se convierte en una herramienta de interesante aplicación en la toma de decisiones.

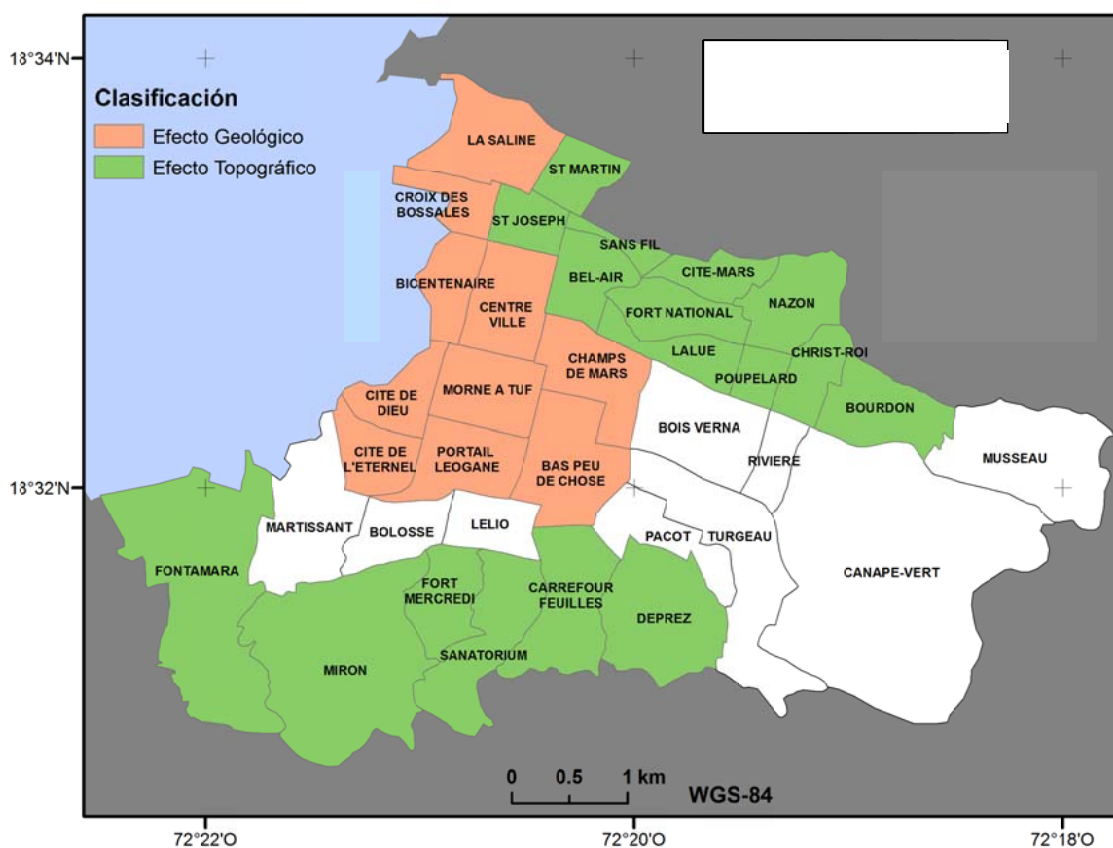


Figura 35. Zonificación de Puerto Príncipe en función de los efectos locales y topográficos

Sería conveniente que este estudio de la relación entre el suelo y los factores geológicos y topográficos, se completara utilizando mapas geomorfológicos -para estudiar el efecto local en el centro y los bordes de la cuenca- y con un modelo de corteza mediante perfiles multidimensionales -para encontrar la estructura de velocidad de ondas de cizalla del paquete sedimentario, penetrando hasta el sustrato rocoso. De momento, este tipo de estudios no se han hecho o no se han publicado. Incluso se podría estudiar si se ha producido interacción suelo-estructura, es decir, si se registran daños en estructuras con periodo predominante del mismo orden que el periodo natural del suelo en que se ubican, ya que se dispone de estos datos. No obstante, esto queda fuera de los objetivos del TFM y se propondrá como línea futura, que servirá incluso para mejorar estos primeros



resultados. Asimismo, se propondrá dar un paso más en el estudio de la relación entre el daño y los demás factores, pasando de este análisis descriptivo a otro de carácter más cuantitativo. Esto es de especial interés cuando se trata de la relación daño-orografía y daño-pendiente, ya que la relación directa entre ellos es un hecho que se observa cada vez que ocurre un terremoto, pero no está tan estudiada ni incorporada en los modelos de predicción del movimiento fuerte del suelo.

9. Cálculo del riesgo sísmico en Puerto Príncipe

Calcular el riesgo sísmico en una ciudad consiste en determinar la probabilidad de daño que se espera sufran las edificaciones a causa de terremotos en el futuro, así como las pérdidas asociadas a estos daños, tanto humanas como económicas. Esta probabilidad de daño está condicionada por la ocurrencia de eventos sísmicos (**peligro**), la existencia de un parque de edificaciones y una población **expuestos** al peligro y su capacidad de resistirlo (**vulnerabilidad**), así como por el **coste** de reparar los daños y hacer frente al impacto social tras el terremoto (Figura 36). El peligro no se puede evitar, pero sí la exposición o, en última instancia, se puede reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos como medida para reducir el riesgo. Con este fin, se llevan a cabo este tipo de estudios.



Figura 36. Definición de riesgo sísmico

El resultado de la evaluación del riesgo sísmico es un conjunto de mapas que representan los daños esperados en las edificaciones (daños físico o estructural), la distribución de pérdidas humanas y el impacto socioeconómico en la ciudad tras la ocurrencia del terremoto. Estos parámetros caracterizan lo que se conoce como escenario de pérdidas. Esta información proporciona a las autoridades locales y estatales las herramientas necesarias para estimular y planificar los esfuerzos de cara a minimizar las consecuencias negativas asociadas a este riesgo natural, y para prepararse ante la gestión de la emergencia cuando se produzca un evento sísmico (FEMA, 2003).

Con la evaluación del riesgo sísmico en una ciudad se consiguen los siguientes objetivos:

- Mayor conciencia, por parte de las instituciones y los ciudadanos, del peligro al que están expuestos.
- Promover una mejor construcción de los edificios, con principios y diseños antisísmicos.
- Mejorar la capacidad de respuesta de los servicios municipales ante las emergencias.

- Mejorar el acceso a los seguros para bienes y personas ante el riesgo sísmico.

Como es habitual en este tipo de estudios, los datos de entrada condicionan los resultados que pueden alcanzarse. En este TFM, dada la falta de información actualizada acerca de habitantes por vivienda (el último censo completo de Haití data de 2003, siete años antes del terremoto), sólo se han considerado como elementos expuestos los edificios, no las personas, y se ha calculado el daño físico que sufrirían en caso de terremoto, pero no su coste de reparación o reconstrucción. En la Figura 37 se muestra el diagrama de flujo del cálculo del riesgo sísmico seguido para este TFM.

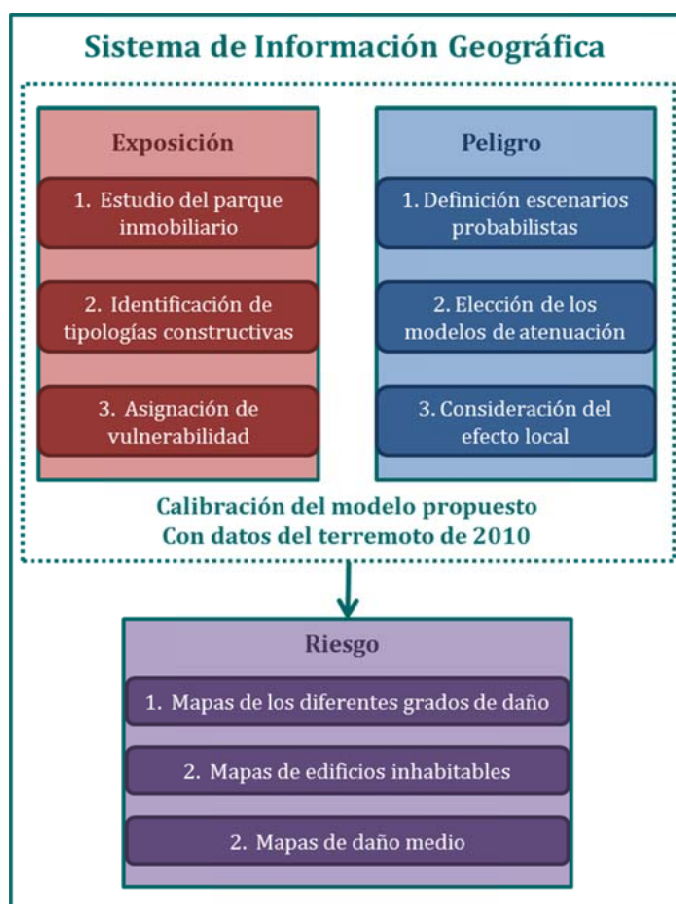


Figura 37. Diagrama de flujo del cálculo del riesgo sísmico en este TFM

En primer lugar, se ha implementado un SIG para dar apoyo al estudio. En él se han distinguido tres grandes bloques: dos de ellos están destinados a obtener los datos de entrada para el cálculo –**exposición y peligro o amenaza**– y el tercero es el de resultados en términos de daños y pérdidas –**riesgo**–.

En el bloque de exposición se ha analizado el parque inmobiliario de la ciudad de Puerto Príncipe, tanto sus características constructivas como su comportamiento en el sismo de 2010. En base a estos dos factores se han definido una serie de tipologías



representativas de los edificios de la ciudad que se han caracterizado por su vulnerabilidad ante terremotos (mediante funciones de daño).

En el bloque de peligro, se han estudiado los posibles escenarios sísmicos que podrían afectar a Puerto Príncipe, a partir de un análisis de las estructuras sismogénicas activas más próximas. A su vez, se han elegido los modelos de predicción del movimiento fuerte del suelo (GMPE) o leyes de atenuación que mejor se adaptan a los condicionantes del estudio y a las características de la zona, y se ha estudiado qué parámetros se pueden emplear para considerar el efecto local o de sitio.

Los *inputs* obtenidos en las fases previas configuran el modelo de cálculo de riesgo sísmico propuesto para Puerto Príncipe. A continuación, se ha procedido a su calibración calculando con SELENA el daño correspondiente al terremoto de 2010–daño estimado- y comparándolo con el causado por dicho sismo–daño observado. Con esta calibración se ha podido refinar el modelo de cálculo y se ha aplicado para estimar los daños que causaría un posible sismo futuro. Por último, los resultados se han representado en mapas.

En los siguientes apartados se detalla cada fase del diagrama.

9.1. Exposición

9.1.1. Estudio del parque inmobiliario y clasificación en tipologías constructivas

Con el fin de simplificar el modelo de cálculo del riesgo sísmico, el parque inmobiliario de una ciudad se clasifica en tipologías constructivas, de forma que cada tipología sea un modelo que represente a un gran conjunto de edificios con características similares. Esta clasificación debe ser tan detallada como sea posible, para así proporcionar resultados realistas, y a su vez, tan general como sea posible, para evitar la manipulación de grandes cantidades de datos que llevaría a complejos e interminables procesos de cálculo. La clasificación en este estudio se ha hecho siguiendo las metodologías desarrolladas en HAZUS (FEMA, 2003) y Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), así como el trabajo de Lagomarsino y Giovinazzi (L&G, 2006).

Durante la campaña de campo de junio de 2011 se recopilaron también datos para esta fase del TFM. Guiados por ingenieros civiles locales, se hizo un recorrido por la ciudad con el fin de conocer los distintos tipos de edificios que se construyen. Se realizaron descripciones acompañadas de fotografías, y de esta manera se pudo hacer una primera aproximación de los prototipos constructivos locales.

A partir del conocimiento adquirido en la campaña de campo y tras estudiar los informes de daños mencionados en el apartado 8, se ha analizado la base de datos aportada por el MOP de Haití para conocer con detalle las características de todos los edificios. En las Figura 38 y Figura 39 se presentan los formularios con los que los ingenieros del MOP recopilaron la información de los edificios de Puerto Príncipe (y otras



ciudades de sur de Haití) durante todo un año. Se puede apreciar el grado de detalle al que llegaron y lo útil que resulta toda esa información para este estudio y otros similares. Los datos que tomaron se listan a continuación:

- Identificación del ingeniero que ha realizado la toma de datos
- Descripción del edificio (nombre, dirección, contacto, coordenadas GPS)
- Tipo de construcción (materiales de la estructura, de las losas, del techo y de las paredes; número de plantas y de sótanos)
- Especificaciones del edificio (superficie, número de residentes y número de locales no habitables)
- Tipo de ocupación (residencial, comercial, industrial...)
- Evaluación del daño sufrido en el sismo de enero de 2010 (detallando el grado de daño –menor, moderado y grave- que observaban en distintos elementos del edificio, tanto estructurales como no estructurales, como en el suelo) y dificultad de la demolición.
- Señalización, es decir, color con que lo clasifican según el daño siguiendo el criterio del semáforo (verde: inspeccionado; amarillo: acceso limitado; rojo: acceso no autorizado)
- Factores de vulnerabilidad sísmica (fecha de la construcción y de las reformas, dureza del suelo en el emplazamiento, inclinación, emplazamiento del edificio, cimientos, forma en planta e irregularidades verticales)



MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS TRANSPORTS ET COMMUNICATIONS				
Evaluation rapide de bâtiments				
DTP-BE #1				
Inspection				
Id. Inspecteur : _____		Date et Heure d'inspection : _____		<input type="checkbox"/> AM <input type="checkbox"/> PM
Affiliation : _____		Zone inspectée: <input type="checkbox"/> Extérieur uniquement <input type="checkbox"/> Extérieur et intérieur		
Description du bâtiment		Type de construction		
Nom du bâtiment :	Structure <input type="checkbox"/> Structure en béton <input type="checkbox"/> Structure en béton armé <input type="checkbox"/> Structure en acier / tôles <input type="checkbox"/> Structure en bois / tôles <input type="checkbox"/> Murs porteurs	Dalle Plancher <input type="checkbox"/> En béton <input type="checkbox"/> En béton armé <input type="checkbox"/> En bois	Murs <input type="checkbox"/> Murs en béton armé <input type="checkbox"/> Murs de blocs non armés <input type="checkbox"/> Murs de blocs armés <input type="checkbox"/> Maçonnerie de roches <input type="checkbox"/> Mûrs de briques <input type="checkbox"/> Bois + maçonnerie	
Adresse :				
Contact/Téléphone :		Toiture <input type="checkbox"/> En béton armé <input type="checkbox"/> En bois / tôle <input type="checkbox"/> En acier / tôle		
Coordonnées GPS:	Nombre d'étage : _____ Nombre de sous-sol : _____			
Autre type: _____				
Spécification du bâtiment		Type d'occupation		
Superficie approximative (mètre carré) :	<input type="checkbox"/> Résidentiel- section unique <input type="checkbox"/> Résidentiel- section multiple <input type="checkbox"/> Assemblée publique <input type="checkbox"/> Santé <input type="checkbox"/> Hôtel	<input type="checkbox"/> Commerce <input type="checkbox"/> Bureaux <input type="checkbox"/> Industriel <input type="checkbox"/> Services d'urgence <input type="checkbox"/> Bâtiment religieux	<input type="checkbox"/> Gouvernement <input type="checkbox"/> Historique <input type="checkbox"/> Ecole <input type="checkbox"/> Autre	
Nombre de résidences :				
Nombre de locaux non habitables :				
Evaluation				
Etudiez les bâtiments pour vérifier leur état et cochez la colonne appropriée ci-dessous				
Etat observé	Mineur/Aucun	Modéré	Grave	Domage estimé
Bâtiment effondré, partiellement effondré ou déplacé Bâtiment ou étage penché	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> aucun <input type="checkbox"/> 0-1% <input type="checkbox"/> 1-10% <input type="checkbox"/> 10-30% <input type="checkbox"/> 30-60% <input type="checkbox"/> 60-100% <input type="checkbox"/> 100%
Murs intérieurs et extérieurs fissurés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Murs intérieurs et extérieurs effondrés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Colonnes, pilastres et corbeaux fissurés et émiettés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dalles, poutres, solives fissurées et écaillées	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Parapets, fermes, terrasses et escaliers endommagés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Détérioration du bâtiment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Fissures ou mouvement du sol	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Autre (spécifier)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Difficulté de la démolition :	Aucun/mineure	Simple	Moyenne	Complexe
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Observations : _____ _____				

Figura 38. Hoja 1 del formulario de evaluación de edificios en Haití tras el sismo de enero de 2010



SIGNALISATION	
Choisissez une signalisation basée sur l'évaluation et le jugement d'équipe. Les conditions graves mettant en danger tout le bâtiment sont des raisons pour interdire l'accès par la signalisation ACCES NON AUTORISE. Les états modérés et peu graves peuvent permettre une signalisation Utilisation restreinte. signalisation INSPECTÉ doit être affichée à l'entrée principale. Les signalisations ACCES LIMITE et ACCES NON AUTORISE doivent être placées toutes les entrées.	
<input type="checkbox"/> Inspecté (fiche verte)	<input type="checkbox"/> accès limité (fiche jaune) <input type="checkbox"/> accès non autorisé (fiche rouge)
<input type="checkbox"/> Le bâtiment est-il vert mais taggé jaune / rouge due au martèlement du bâtiment adjacent	
Enregistrez toutes les restrictions telles qu'indiquées: _____	

AUTRES VERIFICATIONS. Cochez les cases ci-dessous seulement si d'autres actions sont nécessaires	
<input type="checkbox"/> Barricades nécessaires dans la zone: _____	
<input type="checkbox"/> Expertise détaillée recommandée : <input type="checkbox"/> Structurale <input type="checkbox"/> Géotechnique <input type="checkbox"/> Autre _____	
<input type="checkbox"/> Autres recommandations ou restrictions tel qu'inscrit sur la pancarte : _____	
Observations: _____	

Facteurs de vulnérabilité (cochez tout ce qui s'applique) :	
Date de début de construction <input type="checkbox"/> 1 – 10 années <input type="checkbox"/> 11 – 25 années <input type="checkbox"/> 26 – 50 années <input type="checkbox"/> plus de 50 années	
Date de travaux importants de rénovation <input type="checkbox"/> 1 – 5 années <input type="checkbox"/> 6 – 10 années <input type="checkbox"/> plus de 10 années	
Sols de l'emplacement :	
<input type="checkbox"/> Sable de plage <input type="checkbox"/> Sol mou <input type="checkbox"/> Sol ferme <input type="checkbox"/> Roches	
Inclinaison de construction :	
<input type="checkbox"/> Plate <input type="checkbox"/> Modérée <input type="checkbox"/> Abrupte	
Emplacement du bâtiment :	
<input type="checkbox"/> Plage <input type="checkbox"/> Rivière <input type="checkbox"/> Vallée <input type="checkbox"/> Plaine <input type="checkbox"/> Colline <input type="checkbox"/> Flan de coteau <input type="checkbox"/> Sommet	
Fondation :	
<input type="checkbox"/> Dalle/pose sur Grade <input type="checkbox"/> élevé sur Post <input type="checkbox"/> Piles profondes	
Forme en plan :	
<input type="checkbox"/> O <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> H <input type="checkbox"/> L <input type="checkbox"/> T <input type="checkbox"/> U <input type="checkbox"/> Rectangulaires <input type="checkbox"/> Autres	
Irrégularités verticales :	
<input type="checkbox"/> Etage mou <input type="checkbox"/> Dénivelés <input type="checkbox"/> Murs de cisaillement couplés <input type="checkbox"/> Colonnes raccourcies <input type="checkbox"/> Martèlement de bâtiment adjacent	

Figura 39. Hoja 2 del formulario de evaluación de edificios en Haití tras el sismo de enero de 2010

De cada edificio han confeccionado una ficha con un resumen de todas sus características y han implementado una base de datos con todas ellas; esta base de datos es, en la actualidad, el nuevo catastro de Puerto Príncipe, y sin ella, no se habría podido alcanzar en este TFM el nivel de calidad y veracidad en los resultados que se ha alcanzado. En la Figura 40 se muestra un mapa con el número de edificios en los distritos de la ciudad, para tener una idea de su distribución espacial. Se observa que en los distritos del sur (situados en las laderas de las montañas) es donde se concentra el mayor número de edificios, así como en el Fuerte Nacional (distrito 19). En el centro y, sobre todo, en la zona portuaria, es donde se localizan los distritos con menos edificios.

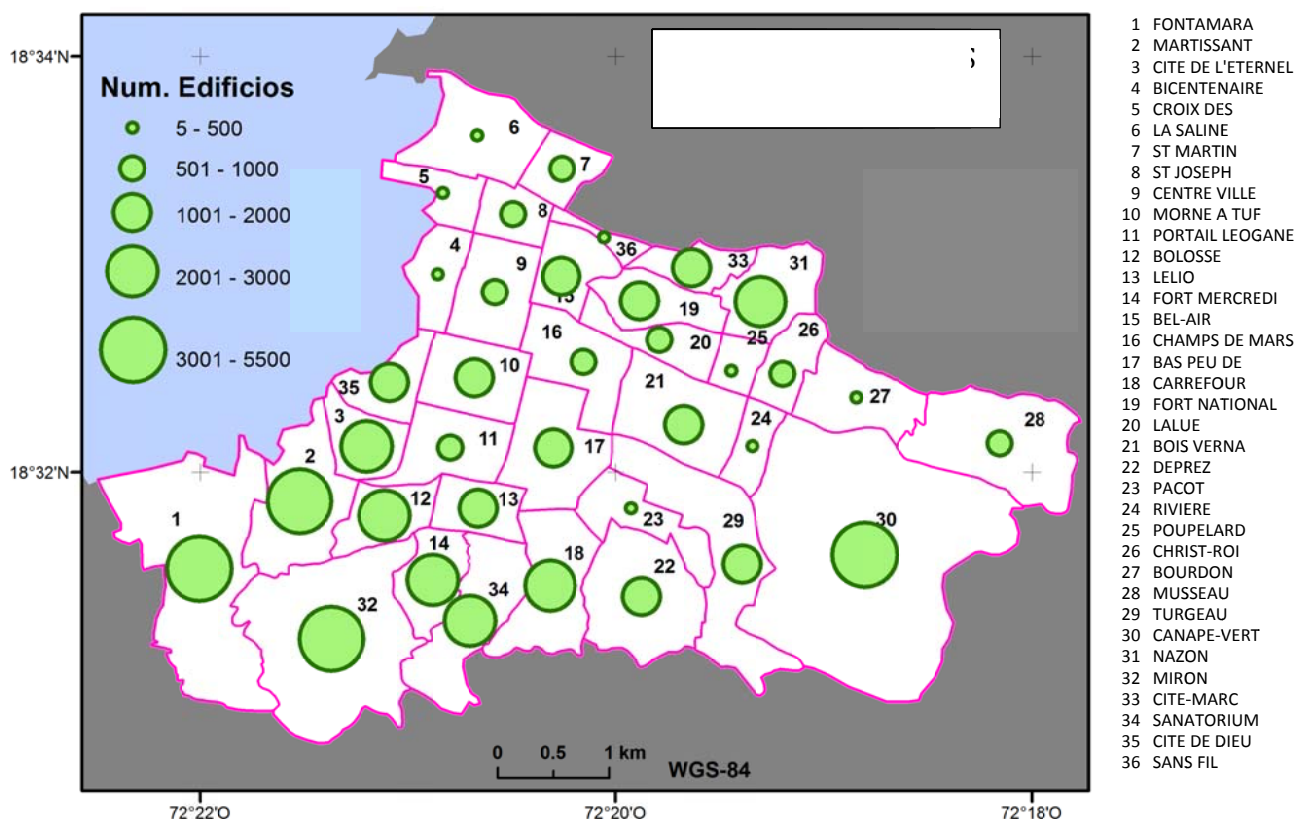


Figura 40. Distribución del número de edificios en Puerto Príncipe

De las fichas de los edificios, los campos más relevantes para la clasificación de las tipologías constructivas han sido:

- Los materiales de la estructura y los muros: determinantes en la clasificación de tipologías.
- El número de plantas: cada tipología se ha clasificado en “baja altura”, si tiene entre 1 y 3 plantas, y “media altura” si tiene entre 4 y 6, siguiendo los criterios de HAZUS [FEM03] y Risk-UE [MIL03].
- El uso: sólo se han considerado viviendas convencionales.

- La pendiente de la calle: para no considerar aquellos edificios ubicados en fuertes pendientes, descartando así la influencia de este factor responsable, en parte, del efecto local.
- El daño causado por el terremoto: que aporta información sobre su resistencia a terremotos, es decir, sobre su capacidad.
- Sus coordenadas: para integrarlos en el SIG.

El resultado ha sido la clasificación de todo el parque inmobiliario de Puerto Príncipe en 8 tipologías (*Model Building Types* - MBT). Su descripción se presenta en la Tabla 2 y su distribución espacial en la Figura 42. Distribución espacial de las tipologías constructivas en Puerto Príncipe.

Tabla 2. Clasificación de tipologías del parque inmobiliario de Puerto Príncipe

MBT	Materiales		Nº Edificios	% Daño completo
	Estructura	Muros		
RC-SW	Hormigón armado	Hormigón armado	1257	16%
RC-CB	Hormigón armado	Bloques de hormigón	63100	18%
RC-UM	Hormigón armado	Mampostería sin reforzar	3273	21%
RL-BM	Mampostería reforzada	Bloques de hormigón	11998	23%
URM1	Mampostería confinada	Mampostería sin reforzar	2766	22%
URM2	Marco de madera	Mampostería sin reforzar	2514	26%
W1	Marco de madera	Madera	868	24%
ST-CB	Marco de acero	Bloques de hormigón	508	22%

Las tres primeras presentan estructura de hormigón armado (HA) y son, por tanto, las más resistentes. De ellas, la RC-CM (Figura 41-A) es la tipología predominante, pues representa a casi el 75% de los edificios de la ciudad (Figura 42. Distribución espacial de las tipologías constructivas en Puerto Príncipe). Las dos siguientes tienen estructura de mampostería, como puede verse en la Figura 41-B correspondiente a la tipología RL-BM, que es la que representa a mayor número de edificios de este tipo (Figura 42. Distribución espacial de las tipologías constructivas en Puerto Príncipe). La URM2 es un tipo de construcción de herencia colonial francesa, con estructura de madera (Figura 41-C) y cerramientos de mampostería sin confinar. Es la que peor se comportó en el sismo de

enero 2010, pues, a pesar de que la madera dota a la estructura de ductilidad, la gran masa que aporta la mampostería contrarresta el buen desempeño que suele caracterizar a las ligeras viviendas de madera (tipología W1 de la Tabla 2). Las dos últimas tipologías (edificios de madera y edificios con estructura de acero) han sido eliminadas del estudio pues representan menos de un 1% del parque inmobiliario; este reducido tamaño de la muestra no ha permitido obtener resultados fiables en el proceso de calibración que se explica en el apartado 9.3.

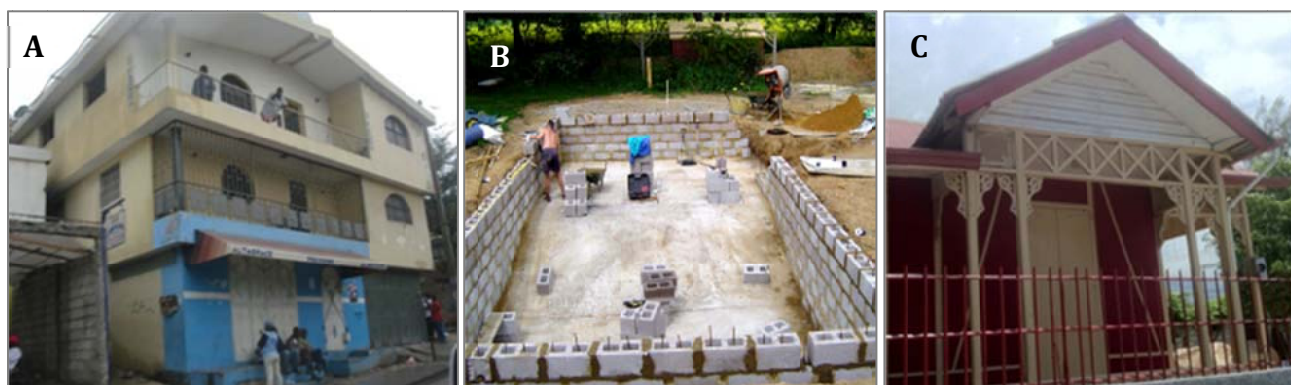


Figura 41. Ejemplos de las tipologías constructivas definidas para Puerto Príncipe.

Imagen A: RC-CB; imagen B: RL-BM; imagen C: URM2

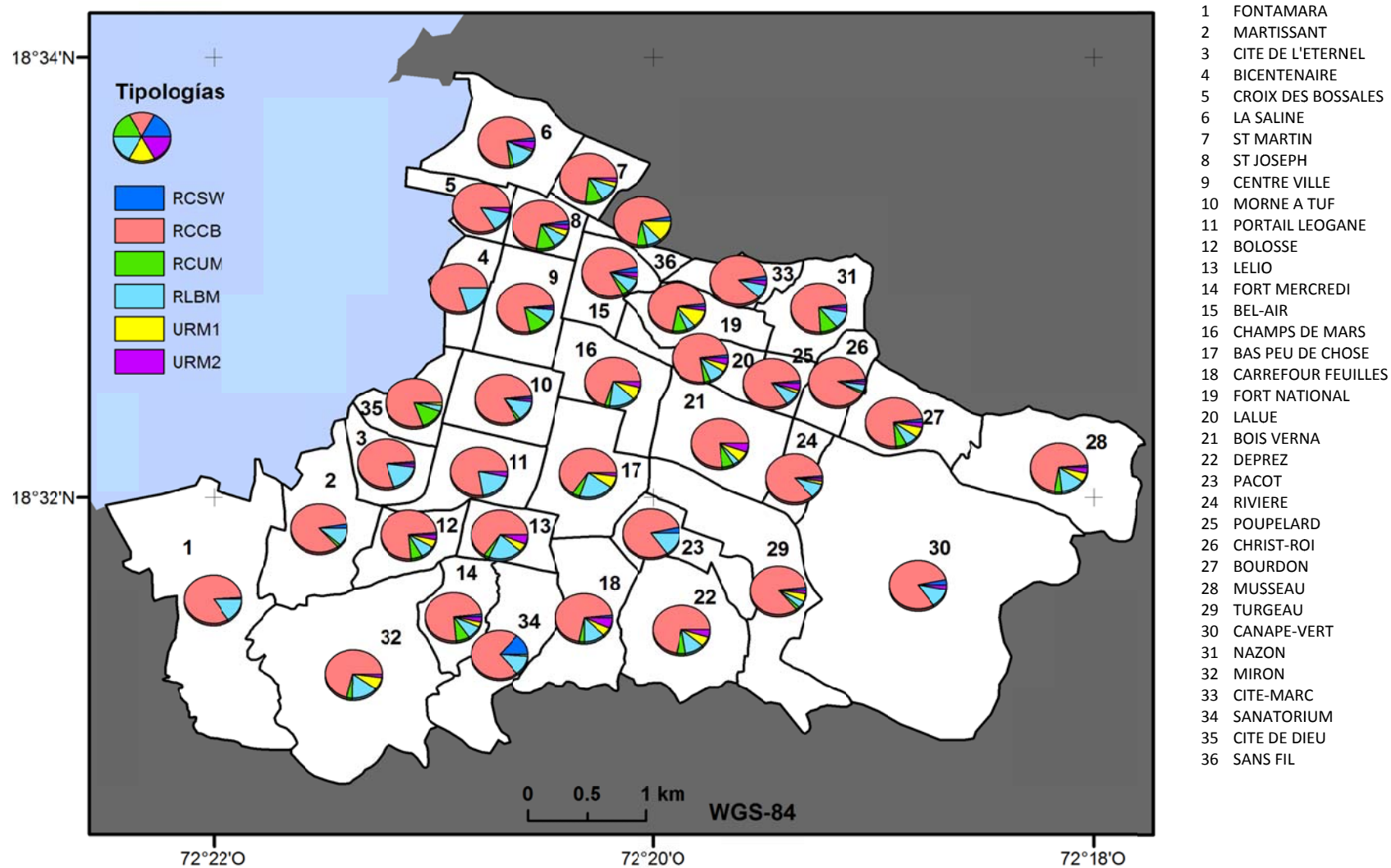


Figura 42. Distribución espacial de las tipologías constructivas en Puerto Príncipe

9.1.2. Asignación de las funciones de daño que caracterizan la vulnerabilidad sísmica

Los resultados de daños que se obtienen a partir de una estimación del riesgo sísmico vienen determinados por el valor del parámetro de movimiento del suelo en la base del edificio -una vez que dicho movimiento ha sido amplificado por la geología y topografía local existente- y la respuesta que dicho edificio manifiesta ante el movimiento -en términos de desplazamiento respecto a la vertical. Este comportamiento de los edificios ante terremotos es conocido como **vulnerabilidad sísmica**. Cuanto más resiste es una estructura el movimiento producido por un sismo, menos vulnerable es.

Hay dos métodos principales para la estimación de la vulnerabilidad sísmica, que se pueden denominar empíricos y analíticos. Los métodos empíricos tratan de generar modelos de comportamiento que se basan en estadísticas de daños en edificaciones debidos a terremotos pasados. Los métodos analíticos se basan en funciones matemáticas que predicen el comportamiento del edificio en función de su diseño, sus materiales, etc. y que se han obtenido a través de un cálculo que considera modelos teóricos de la estructura (i.e, análisis *push-over* -Figura 43-) y observación experimental (FEMA, 2005). Tanto los métodos empíricos como los analíticos tienen ventajas y desventajas, y la comunidad científica continua usando ambos. En este estudio, se ha aplicado el método analítico y, por tanto, la vulnerabilidad se ha representado mediante funciones de daño: espectros de capacidad y curvas de fragilidad de cada tipología constructiva.

En la Tabla 3 se expone cuáles son las funciones de daño que se han asignado a los MBT por ser las que, a priori y en función únicamente de la descripción de esas tipologías, mejor pueden reproducir el comportamiento de los edificios ante terremotos. Estas funciones de daño se han obtenido de los trabajos de L&G (2006) y HAZUS (FEMA, 2003), que han reducido la diversidad del parque de edificaciones en Europa y Estados Unidos, respectivamente, a un conjunto de tipologías representativas y, a través de métodos de análisis estructural, se ha simulado de una forma analítica el comportamiento de dichas tipologías ante el movimiento del suelo.

Tabla 3. Funciones de daños asignadas a priori a los MBT definidas para Puerto Príncipe

MBT	Función de Daño (FD)
RC-SW	RC2 (Table 6, L&G, 2006).
RC-CB	RC1-(Table 6, L&G, 2006
RC-UM	C3 – Precode (Table 5.7d, FEMA, 2003)
RL-BM	M7 (Table 5, L&G, 2006)
URM1	M6 (Table 5, L&G, 2006)
URM2	M5 (Table 5, L&G, 2006)

Las tipologías para las que se calcularon esas funciones de daño están descritas en HAZUS, Risk-UE y L&G, y pueden consultarse en:

- RC2, RC1 y M5: Risk-UE-WP 1, pág. 19 (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)
- C3: HAZUS MR4, pág. 5-10 (FEMA, 2003)
- M6 y M7: Lagomarsino y Giovinazzi (2006), pág. 418

Según el número de plantas que tengan los edificios, los MBT se clasifican a su vez en baja, media y alta elevación (*low*, *medium* y *high rise*). Esto es necesario porque el comportamiento de los edificios ante un sismo no es independiente de su altura, y por tanto, hay que crear modelos diferentes para someterlos al análisis estructural y obtener curvas de capacidad y fragilidad para cada uno de ellos. Cada metodología establece el número de plantas correspondiente a cada nivel de elevación, tal y como se expone en la Tabla 4:

Tabla 4. Clasificación de la elevación por número de plantas según metodología

Elevación	Nomenclatura	HAZUS	L&G
		Nº plantas	Nº plantas
Low-rise	L	1-3	1-2
Mid-rise	M	4-7	3-5
High-rise	H	>8	>6

Hay que mencionar que HAZUS establece el número de plantas correspondiente a cada nivel de elevación dependiendo de la tipología. En la Tabla 4 se ha indicado el criterio que sigue la tipología C3, empleada en este estudio. En los demás MBT que define se aplica el mismo criterio, excepto para los edificios de madera (W1 y W2), dos tipologías de mampostería (RM1 y URM) y las viviendas móviles (MH).

Para cada tipología, tanto HAZUS como L&G han obtenido las curvas de capacidad llevando a cabo un análisis *push-over* (Figura 43). Básicamente, éste consiste en modelar una estructura, someterla a una fuerza cortante en su base que simule la generada por una sacudida sísmica, y medir el desplazamiento que experimenta la estructura en la última planta. La curva de capacidad relaciona la fuerza en la base (V) y el desplazamiento (d) y representa la resistencia del edificio a sufrir daños por sismo.

Para simplificar el modelo, se relaciona el comportamiento de la estructura con el de un sistema equivalente de un grado de libertad (*SDOF-single degree of freedom*), y se obtiene la curva de capacidad del SDOF, que es el conocido como espectro de capacidad de la estructura. Estos espectros relacionan la aceleración espectral correspondiente a la fuerza cortante generada por el movimiento sísmico en la base del edificio (S_a , denotada en la Figura 43 como V^*) con el desplazamiento máximo espectral (S_d , denotada como d^*).

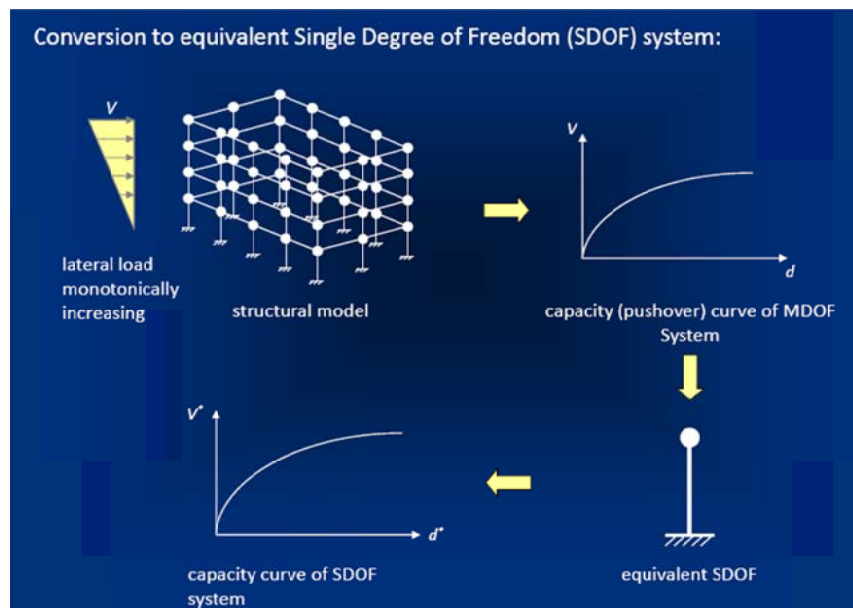


Figura 43. Esquema del análisis push-over (E. Erduran, comunicación personal)

En la Tabla 5 se presentan los parámetros de los seis espectros de capacidad propuestos para los MBT de baja elevación (*low rise*) definidos en este estudio, y en la Figura 44 se han representado gráficamente; en la leyenda de la gráfica se indica su procedencia.

Tabla 5. Parámetros de los espectros de capacidad asignados a seis tipologías constructivas de Puerto Príncipe

MBT	Dy (m)	Ay (m/s ²)	Du (m)	Au (m/s ²)
RC-SW-L	0.020	2.727	0.061	2.72
RC-CB-L	0.015	2.031	0.045	2.031
RC-UM-L	0.003	0.981	0.034	2.207
RL-BM-L	0.003	4.980	0.023	4.980
URM1-L	0.004	3.178	0.017	3.178
URM2-L	0.002	2.580	0.011	2.580

Los espectros de capacidad presentan dos tramos: uno inicial de mayor pendiente que representa el comportamiento elástico de la estructura ante una acción sísmica, seguido de otro de menor pendiente que describe su comportamiento cuando ésta entra en la fase plástica. Durante la fase elástica, el edificio es capaz de sufrir deformación a causa del movimiento sísmico en su base, pero recupera su estado inicial cuando el movimiento cesa. Por tanto, en esta fase no se producen daños estructurales (aunque sí se pueden producir daños en elementos no estructurales). El punto en el que comienza la fase plástica se denomina **punto de fluencia** [*yield point* (Dy, Ay)], y marca el desplazamiento

espectral que debería producirse en el edificio para que comenzaran a aparecer los primeros daños estructurales. Durante toda su fase plástica, el edificio va sufriendo deformaciones permanentes (daños), y no recupera su estado inicial aunque cese el movimiento sísmico. El punto del espectro que se corresponde con el mayor desplazamiento espectral es el llamado **punto último** [*ultimate point* (Du, Au)]; cuando el edificio alcanza ese desplazamiento espectral, colapsa.

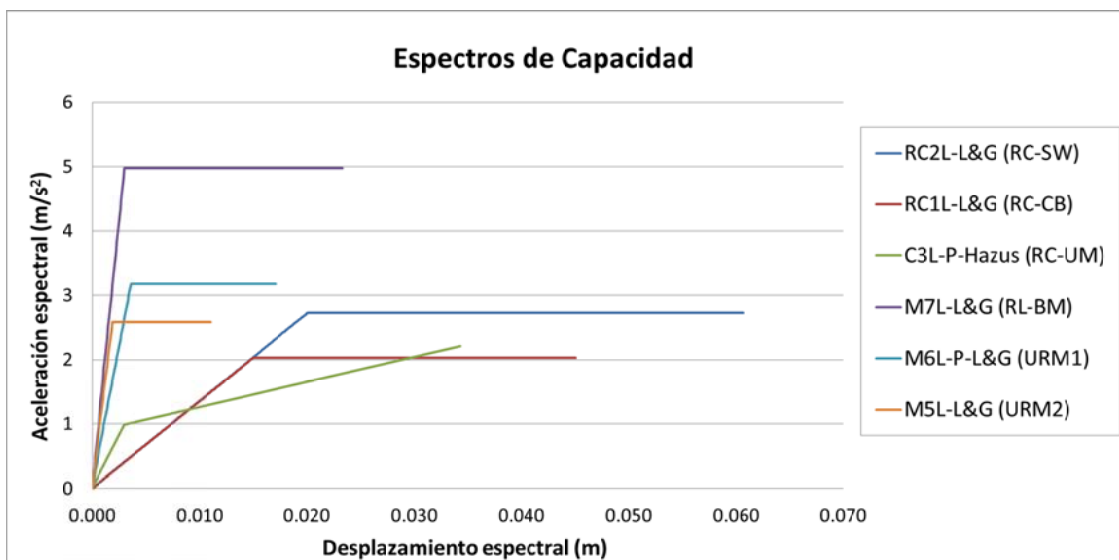


Figura 44. Espectros de capacidad propuestos para seis tipologías constructivas de Puerto Príncipe

En los espectros de capacidad también se refleja la **ductilidad** del edificio, que es la capacidad de sufrir daños sin llegar a colapsar. Al generarse daños en una estructura, se disipa energía, y por tanto la carga que debe soportar un edificio en las plantas superiores es menor, previniéndolo del colapso. La relación entre los desplazamientos espectrales del punto último y el de fluencia es un indicador de la ductilidad de una estructura, de forma que cuanto mayor sea ese ratio, más dúctil es un edificio.

Como puede apreciarse en la Figura 44, los espectros de las tres tipologías más resistentes (RC2, RC1 y C3) indican que éstas soportan mayores desplazamientos antes de comenzar a sufrir daños, pero menores aceleraciones, y son más dúctiles.

Tratándose de Haití, y tras conocer las deficientes prácticas de construcción locales y haber estudiado las causas del mal comportamiento de sus edificios durante el sismo de enero de 2010, hay que ser conscientes de que los espectros que se han propuesto en este modelo de cálculo estarían sobrevalorando la capacidad de las estructuras. Es decir, los edificios para los que se obtuvieron los espectros que se han propuesto y que se muestran en la Figura 44, son más resistentes que los que se construyen en Haití, por tanto, cuando se calibren estos espectros de capacidad con los datos de daños del terremoto de 2010, es de esperar que se reduzcan (ver apartado 9.3).

Las curvas de fragilidad para cada grado de daño se han obtenido a partir de los parámetros de los espectros de capacidad, aplicando las ecuaciones propuestas en HAZUS y en L&G:

$$P[D_s|S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,D_s}} \right) \right] \quad (ec. 1)$$

donde:

$P[D_s|S_d]$ es la probabilidad de que la estructura alcance o exceda el estado de daño D_s debido al desplazamiento S_d .

Φ es la función de distribución log-normal estándar acumulativa.

β es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daño D_s . Este valor se ha definido como función de la ductilidad ($\mu = D_u/D_y$) del espectro de capacidad, con el fin de obtener una dispersión en la distribución del daño equivalente a la resultante del daño observado.

$$\beta = 0,4 \cdot \ln \mu \quad (ec. 2)$$

S_{d, D_s} es el valor medio del desplazamiento espectral al que la estructura alcanza el umbral del estado de daño D_s . Depende de D_y y D_u

En la Figura 45 se muestran las curvas de fragilidad para la tipología RC-SW, baja elevación, obtenidas con las ecuaciones anteriores, a modo de ejemplo.

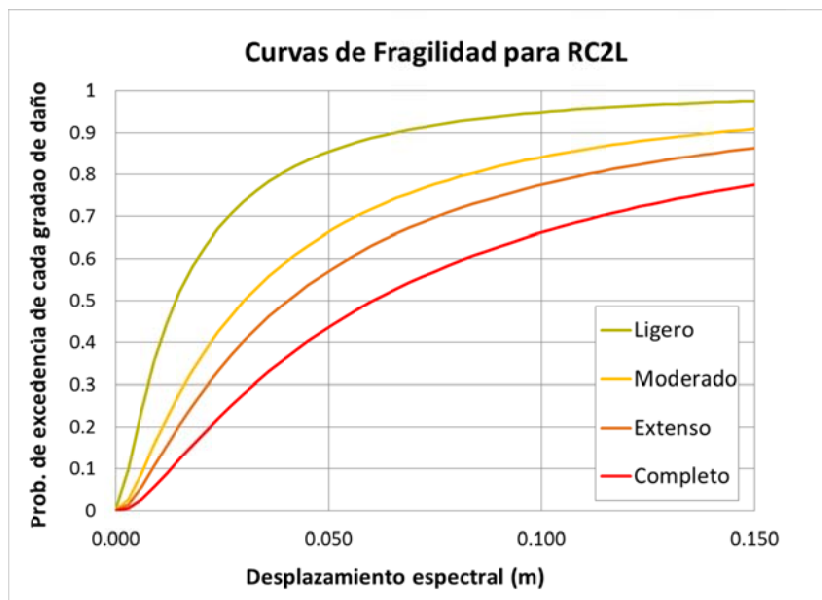


Figura 45. Curva de fragilidad asignada a la tipología RC-SW

Estas curvas indican la probabilidad de que los edificios de esa tipología alcancen o superen cada grado de daño, en función del máximo desplazamiento espectral que experimenten debido al movimiento sísmico. La definición de los grados de daño no es

única, sino que cada metodología (HAZUS o Risk-UE) da una definición en función de la tipología. Además, según el método con que se haya caracterizado la vulnerabilidad (empírico o analítico), también varía. La Tabla 6 es una traducción de la tabla 4.1 del *Work Package 4, Vulnerability of current buildings*, de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). En ella, los autores han establecido una correspondencia entre los grados de daño definidos en diferentes metodologías, así como una descripción muy genérica de estos daños (para obtener información más detallada sobre la correspondencia entre grados de daños es recomendable consultar el trabajo de Hill y Rossetto, 2008)

Tabla 6. Descripción de los grados de daño y correspondencia entre escalas.

Grado de daño	Metodología			Descripción
	EMS-98	Risk-UE	HAZUS	
0	Nulo	Nulo	Nulo	No hay daño
1	Ligero	Ligero	Ligero	Daño imperceptible o ligero
2	Moderado	Moderado	Moderado	Daño estructural ligero Daño no estructural moderado
3	Sustancial-grave	Severo	Extenso	Daño estructural moderado Daño no estructural grave
4	Muy grave	Colapso	Completo	Daño estructural grave Daño no estructural muy grave
5	Destrucción			Daño estructural muy grave, prácticamente colapso

9.2. Peligro

9.2.1. Definición de escenarios sísmicos deterministas

Tras estudiar el marco sismo-tectónico general expuesto en el apartado 6, el equipo de geólogos del grupo de trabajo Sismo-Haití ha realizado un estudio más detallado de la fuente sísmica generadora del sismo de enero de 2010 y de otras fuentes cercanas a la ciudad de Puerto Príncipe. Con ello, se han podido definir los escenarios sísmicos deterministas a simular en este estudio.

En relación con la fuente geológica del terremoto de 2010, se ha realizado un análisis de los antecedentes bibliográficos que tratan el terremoto, así como de la estructura local. Inicialmente se interpretó que la falla responsable del evento de enero de 2010 debía ser la falla de Enriquillo, que había acumulado energía elástica suficiente como para generar un terremoto de tales características (Manaker et al., 2008, Calais et al., 2002). Sin

embargo, tanto las observaciones de campo (Prentice et al., 2010) como los modelos de deslizamiento obtenidos a partir de datos telesísmicos, GPS e InSAR (Calais et al., 2010, Hayes et al., 2010) muestran un tipo de rotura diferente al esperado en la falla de Enriquillo. Los datos actuales hacen pensar que en realidad no fue la falla de Enriquillo la responsable del destructivo terremoto, sino una falla con deslizamiento oblicuo, inverso-desgarre, con buzamiento al norte, asociada quizás al cinturón de deformación compresiva situado al norte de la falla de Enriquillo.

En cuanto a otras fuentes sismogénicas alrededor de Puerto Príncipe, para este estudio sólo resultan de interés las que generarían el evento más probable y el extremo. En la falla de Enriquillo, en el siglo XVIII se produjeron dos terremotos de magnitudes Mw 7,5 (McCann (2006); Ali et al. (2008)). La cercanía temporal hace pensar en el funcionamiento de un *triggering* (mecanismo de disparo) que pudo inducir el segundo. Considerando que este mecanismo se repita tras la ocurrencia del evento de 2010, cabría esperar en los próximos decenios un terremoto de magnitud Mw > 7,1 en un segmento al este de la ciudad de Puerto Príncipe. Por ello, se podría considerar como terremoto extremo un evento de Mw 7,2 que ocurriera sobre esta falla y diera lugar a la reactivación del segmento Dumay. El evento más probable sin considerar la magnitud máxima, podría darse en un segmento de la falla Matheux-Neiba, donde la sismicidad es más frecuente, y por tanto, la ocurrencia de un evento en ese segmento tendría mayor probabilidad. En este caso, el terremoto podría generarse en el segmento este de Matheux-Neiba, con Mw 7,0. En este estudio se ha simulado, además del escenario del sismo de enero de 2010 para la calibración del modelo de cálculo, el de Matheux-Neiba, por ser el más probable. En la simulación de ambos escenarios, además de la magnitud del sismo, se tiene en cuenta las características de las correspondientes fallas en cuanto a geometría y orientación.

En la Tabla 7 se resumen los parámetros que definen los escenarios sísmicos deterministas a simular en SELENA y en la Figura 46 se han representado en un mapa.

Tabla 7. Parámetros de los escenarios sísmicos definidos para este estudio (J. Martínez-Díaz, com .personal).

Nombre	Posición		Mw	Profundidad	Mecanismo		
	Longitud	Latitud			Acimut	Buz.	Disloc.
Ene-2010	-72.571	18.443	7.0	13 km	264º	43º N	43º
Matheux-Neiba	-71.952	18.623	7.0	10 km	291º	55º N	90º

NOTA: la posición viene dada por las coordenadas geográficas (WGS-84) del epicentro; Buz. es el buzamiento de la traza de falla; Disloc. es el ángulo de dislocación de la falla

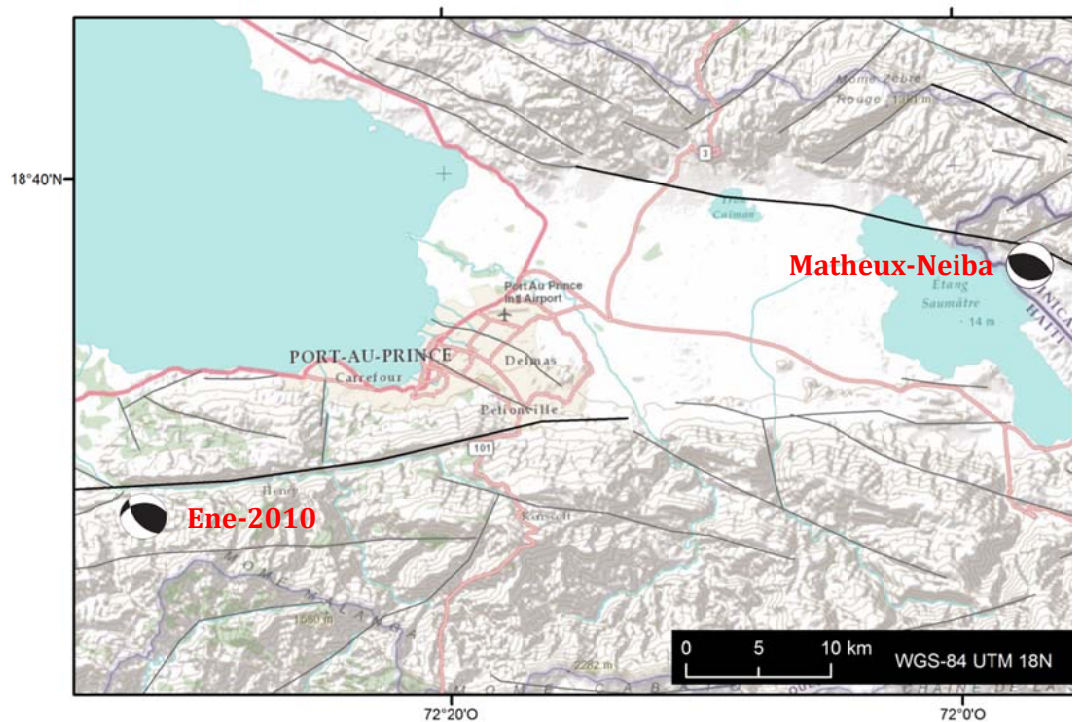


Figura 46. Mapa de los escenarios sísmicos propuestos

9.2.2. Selección de modelos de predicción del movimiento fuerte del suelo

La inexistencia de una red acelerométrica en Haití no ha permitido el registro continuado de datos de aceleración del movimiento del suelo asociados a los terremotos ocurridos, lo que ha impedido la obtención de modelos espectrales de atenuación del movimiento del suelo (GMPE) específicos para la región. Esos modelos permiten predecir las aceleraciones pico (PGA) y espectrales (SA) para diferentes magnitudes, distancias y coberturas geológicas, y se usan tanto en las evaluaciones de la peligrosidad sísmica como en la obtención de escenarios de riesgo sísmico, como es este caso. Ha sido necesario, por tanto, recurrir a la bibliografía existente para tratar de escoger, entre los trabajos más recientes, aquellos modelos de atenuación que pudieran ser aplicados a Haití por haber sido obtenidos con datos de terremotos que se propagan en ambientes tectónicos y geológicos similares a los de este país. Para ello, en primer lugar se ha consultado en los trabajos de Frankel et al. (2011) y de Bozzoni et al. (2011) los GMPE que han empleado estos autores en sus cálculos regionales de peligrosidad probabilista en Haití y en las Antillas Menores, respectivamente.

Entre todos los modelos utilizados en dichos trabajos, se ha optado por emplear en este estudio cuatro modelos de los generados recientemente por el *Pacific Earthquake Engineering Research Centre*, aprovechando que se han podido obtener todos los parámetros de las fuentes sismogénicas necesarios para aplicarlos. Se trata de los denominados *Next Generation Attenuation models* (modelos NGA). Estos modelos se

publicaron en un volumen especial de la revista *Earthquake Spectra* (Vol.24, No. 1, Feb.2008) y para este estudio se han seleccionado los siguientes como posibles candidatos a ser aplicados en Haití: Abrahamson y Silva (2008) (en adelante A&S-08), Boore y Atkinson (2008) (en adelante B&A-08), Campbell y Bozorgnia (2008) (en adelante C&B-08) y Chiou y Youngs (2008) (en adelante C&Y-08). El GMPE de Idriss (2008) no se ha podido utilizar dada la restricción que este modelo presenta para los valores del parámetro V_{s30} , ya que sólo puede utilizarse para suelos con $450 \text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 900 \text{ m/s}$, y en esta zona de estudio, parte del centro de la ciudad y la zona portuaria tienen valores de V_{s30} por debajo de 450 m/s (Figura 48).

La Tabla 8 presenta los parámetros que consideran los anteriores modelos en su forma funcional para predecir el movimiento del suelo en caso de terremoto.

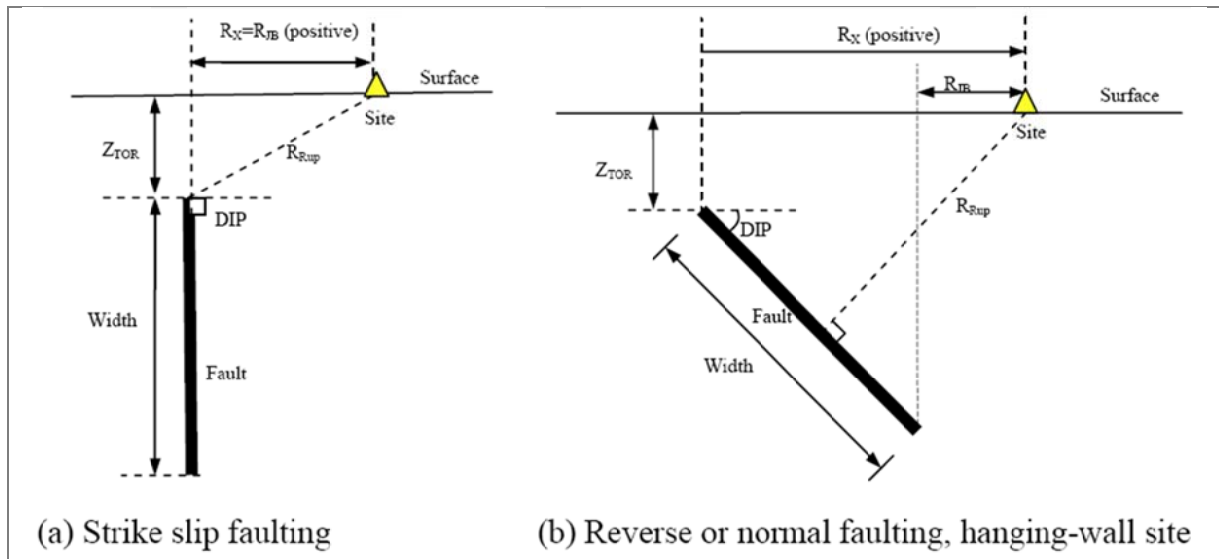
Tabla 8. Parámetros utilizados por los modelos de movimiento fuerte utilizados en este estudio

Parámetro	A&S-08	B&A-08	C&B-08	C&Y-08
M_w		X	X	X
R_{RUP}	X		X	X
R_{JB}	X	X	X	X
R_X	X			X
U		X		
F_{RV}	X	X	X	X
F_N	X	X	X	X
F_{SS}		X		
F_{HW}	X			X
δ	X		X	X
Z_{TOR}	X		X	X
V_{S30}	X	X	X	X
F_{Measured}	X		X	
Z_{1.0}	X			X
Z_{2.5}			X	
W	X			X
F_{AS}	X			

A continuación se definen estos parámetros, y en la Figura 47 se muestran los gráficos extraídos de Kaklamanos et al., (2011) para facilitar la comprensión de los parámetros geométricos:

- **M_w**: magnitud momento
- **R_{RUP}**: distancia más corta a la ruptura

- R_{JB} : distancia más corta a la proyección en superficie de la ruptura
- R_X : distancia horizontal a la proyección en superficie de la parte más alta del plano de ruptura, medida en perpendicular a la traza de la falla
- U : factor de mecanismo desconocido. Vale 1 si no se conoce el mecanismo focal; vale 0 en caso contrario
- F_{RS} : factor de falla inversa. Vale 1 si la falla es inversa o inversa-oblicua; vale 0 en otros casos
- F_{NS} : factor de falla normal. Vale 1 si la falla es normal; vale 0 en otros casos
- F_{SS} : factor de falla de desgarre. Vale 1 si la falla es de desgarre; vale 0 en otros casos
- F_{HW} : factor de bloque superior (*hanging wall*). Vale 1 cuando el emplazamiento está del lado del bloque superior con respecto a la parte superior de la ruptura; vale 0 en caso contrario, es decir, cuando está del lado del bloque inferior (*foot-wall*)
- δ : buzamiento medio del plano de ruptura
- Z_{TOR} : profundidad de la parte superior de la ruptura
- V_{s30} : velocidad media de las ondas de cizalla en los primeros 30m de corteza
- $F_{Measured}$: factor de V_{s30} . Vale 1 si la V_{s30} ha sido medida; vale 0 si ha sido inferida
- $Z_{1.0}$: profundidad a la que la V_{s30} alcanza valores de 1000 m/s
- $Z_{2.5}$: profundidad a la que la V_{s30} alcanza valores de 2500 m/s
- W : ancho del plano de ruptura
- F_{AS} : factor de réplica. Vale 1 si es réplica; vale 0 si es evento principal



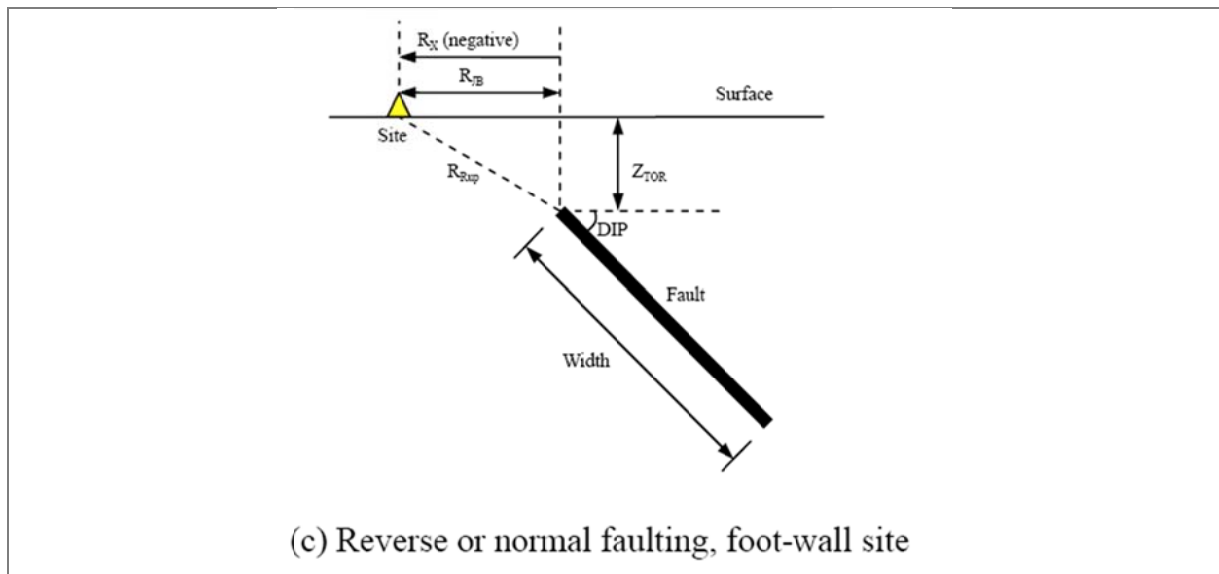


Figura 47. Esquema aclaratorio de los parámetros geométricos que utilizan los GMPE de la NGA.

9.2.3. Consideración del efecto local

El movimiento del suelo se ve influenciado de una manera importante por los efectos locales debidos a la geología superficial y a la topografía, como se ha visto en el apartado 8.2. Los GMPE actuales, entre ellos los empleados en este estudio, sólo permiten considerar el efecto local por la geología por medio del parámetro V_{s30} y no incorporan aun ningún parámetro que dé cuenta del efecto topográfico.

Los valores de V_{s30} se han tomado de Cox et al. (2011), como ya se explicó en el apartado 7.1, y por tanto, el centroide de cada geounidad (puntos del área de estudio donde se ha calculado el input sísmico) tiene asignado un valor de V_{s30} con su correspondiente desviación estándar (σ) (Figura 48). En este estudio se han utilizado tres valores de V_{s30} en cada cálculo del movimiento del suelo, y se han nombrado de la siguiente forma:

- Suelo 1: cuando se ha introducido en el GMPE la media de V_{s30}
- Suelo 2: cuando se ha introducido en el GMPE la media de $V_{s30} - \sigma$
- Suelo 3: cuando se ha introducido en el GMPE la media de $V_{s30} + \sigma$

El factor topográfico que no ha podido ser incluido por medio de ningún parámetro, se ha tenido en cuenta en el proceso de calibración eliminando de la base de datos aquellos edificios que se encuentran ubicados en el Fuerte Nacional y en zonas de fuerte pendiente, de manera que los efectos de sitio observados se puedan relacionar directamente con la geología local y no con la topografía (ver apartado 9.3).

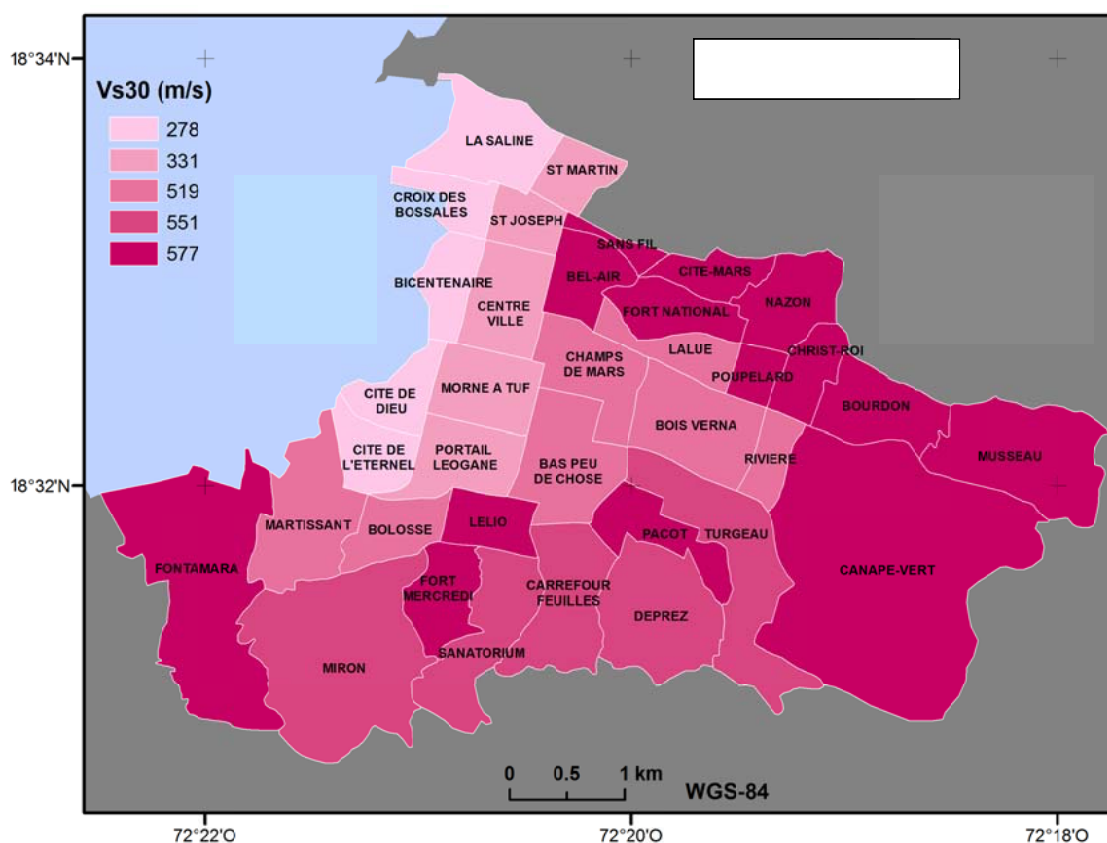


Figura 48. Mapa de Vs30 en la ciudad de Puerto Príncipe

9.3. Calibración del modelo de cálculo propuesto con datos de daños del terremoto de enero de 2010

En la estimación del riesgo sísmico intervienen el movimiento del suelo en la base del edificio y la respuesta de dicho edificio ante la sacudida. El movimiento del suelo se obtiene en la fase de cálculo del peligro o amenaza, y la respuesta del edificio viene condicionada por su vulnerabilidad, es decir, por las funciones de daño que representan su comportamiento ante sismos y la probabilidad de que quede dañado.

En realidad, la imposibilidad de determinar de una manera directa y fiable tanto el modelo de movimiento del suelo como las funciones de daño, lleva a recomendar la calibración de ambos modelos a partir de los resultados de los daños observados en el sismo de 2010, aprovechando la existencia de estos datos en diferentes tipologías estructurales y en diferentes tipos de suelo. Teniendo en cuenta que existe una dependencia directa del daño con ambos modelos (movimiento y vulnerabilidad) simultáneamente, se ha planteado una calibración en dos fases:



FASE 1. Elección de los modelos de movimiento fuerte del suelo y valores de Vs30:

En primer lugar, se ha reproducido el escenario del sismo de enero de 2010 con el modelo de cálculo propuesto, compuesto de forma específica por:

- Las funciones de daño escogidas de la literatura (Tabla 3) para las tipologías constructivas definidas en Haití, tal y como se ha explicado en el apartado 9.1.1.
- Los modelos de movimiento fuerte propuestos en el apartado 9.2.2
- Los valores de Vs30 planteados en el apartado 0.

En función de los residuos que se han obtenido tras comparar el escenario de daños calculado con el observado, se han identificado los modelos de movimiento fuerte y los valores de Vs30 más adecuados, es decir, los que menores residuos han arrojado.

Aunque el cálculo se ha realizado con todas las tipologías, las decisiones que se han tomado en esta primera fase se han apoyado más en los residuos obtenidos para la tipología RC-CB, ya que ésta representa el 75% del parque de edificaciones en la ciudad de Puerto Príncipe.

FASE 2. Calibración de las funciones de daño. Factores de corrección.

A continuación (y teniendo en cuenta que los materiales y técnicas constructivas en Haití no se aplican en base a los criterios y normas que se exigen en los países donde se obtuvieron las funciones de daño propuestas), una vez fijados en la fase anterior los modelos de atenuación y los valores de Vs30 más adecuados, se ha realizado el proceso iterativo que se muestra en la Figura 49 para calibrar las funciones de daño, en el que se han ido variando únicamente los parámetros de éstas en función de los residuos.

Analizando el diagrama de flujo (Figura 49) se puede observar que los inputs de entrada para el primer proceso (reproducción del escenario de enero de 2010) son los GMPE y los valores de Vs30 seleccionados en la fase 1 (que son invariables en esta fase) y los parámetros de las funciones de daño.

Tras cada simulación del escenario de enero de 2010, se obtiene un daño calculado. Éste se compara con el observado y se obtienen los residuos absolutos (número de edificios que alcanzan cada grado de daño estimado por el modelo de cálculo menos el número de edificios que alcanzaron cada grado de daño en el sismo de 2010) y porcentuales (respecto del total de edificios de cada tipología). Si el residuo porcentual es mayor de $\pm 5\%$ (se ha considerado que este umbral supone un error aceptable para este estudio), se modifican los parámetros de las funciones de daño y se repite el proceso con los parámetros nuevos. Éste se detiene cuando los residuos porcentuales no superan el umbral adoptado del 5%.

Esta fase de calibración se aplicará a todas las tipologías propuestas.

A continuación se detallan ambas fases.

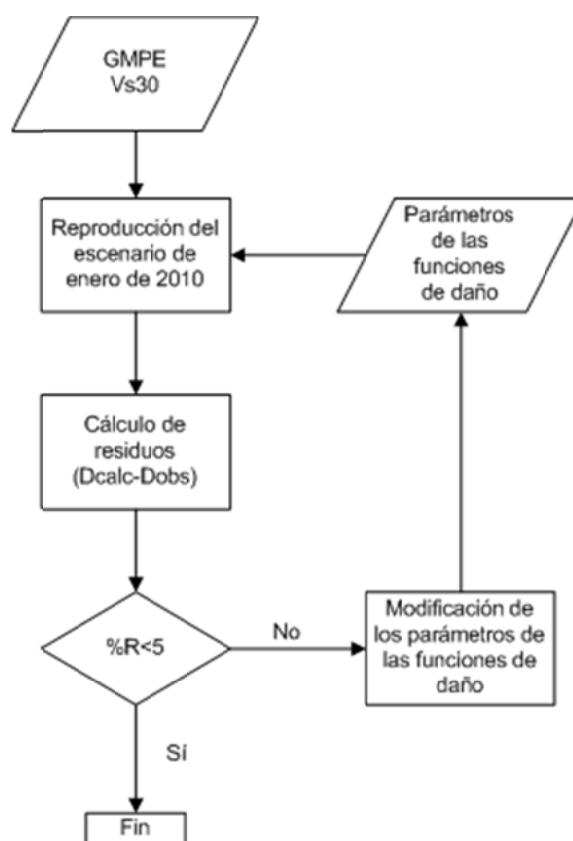


Figura 49. Diagrama de flujo del proceso de calibración iterativo para ajustar las funciones de daño

9.3.1. Fase 1. Elección de los modelos de movimiento fuerte del suelo y valores de Vs30

9.3.1.1. Reproducción del escenario de enero de 2010

La reproducción del escenario de enero de 2010, así como todos los cálculos de escenarios de daños de este estudio, se ha realizado con SELENA (Molina et al., 2010). Se trata de un programa de código abierto y libre difusión para calcular riesgo sísmico en áreas urbanas utilizando el método capacidad-demanda. El usuario proporciona al programa una serie de archivos de entrada donde se especifica, por tipologías, el área construida, el número de edificios, las personas que los habitan, los costes por metro cuadrado de repararlos o reconstruirlos y las funciones de daño, así como los modelos de movimiento fuerte y los parámetros que describen el tipo de suelo. La herramienta calcula la probabilidad de que los edificios de cada tipología alcancen o superen cada grado de daño (nulo, ligero, moderado, extenso y completo). A partir de esas probabilidades, se obtiene el número de edificios que se espera queden dañados (y/o el área que estos ocupan), el coste de repararlos o reponerlos y las víctimas. Como ya se ha comentado con anterioridad, en este estudio sólo se ha calculado el daño físico, es decir, el número de edificios que se espera alcancen o superen cada grado de daño.

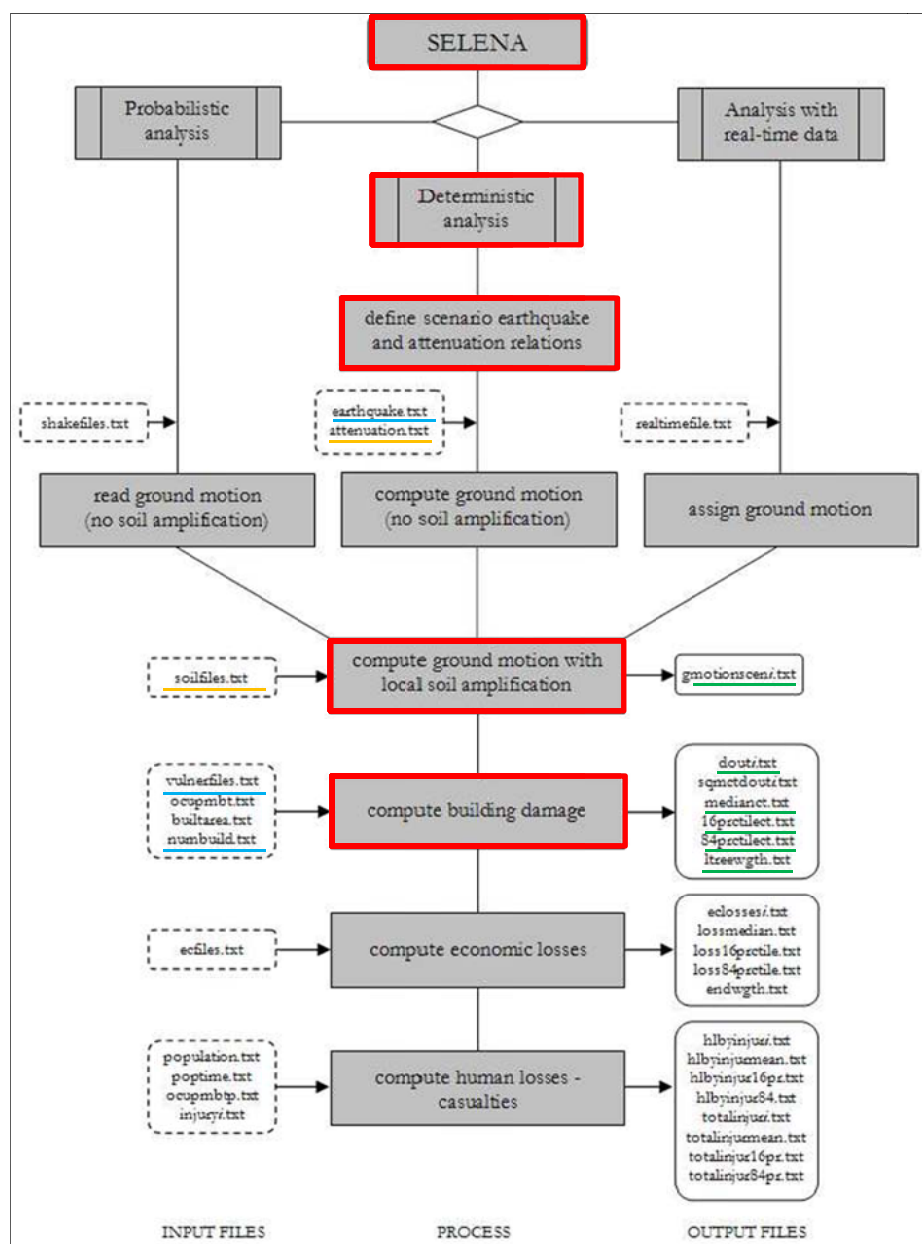


Figura 50. Diagrama de flujo de SELENA (extraído de Molina et al., 2010)

En la Figura 50 se muestra el diagrama de flujo completo de SELENA, y sobre él se han marcado en rojo los pasos que se han seguido en este estudio en concreto. La innovación que incorpora este programa con respecto a otros *softwares* de cálculo de riesgo sísmico, es el uso del árbol lógico para considerar las incertidumbres epistémicas relacionadas con la elección de los parámetros de entrada en el cálculo. De esta manera, el programa proporciona los resultados finales con sus correspondientes niveles de confianza. La estructura del árbol lógico se muestra en la Figura 51, donde cada recuadro en línea discontinua es un nodo, y cada caja dentro de los nodos es una rama. En la Figura 50, además, se han subrayado los ficheros con los que se ha trabajado: en azul se han marcado

los ficheros de entrada que son un archivo único y en naranja los que son un nodo del árbol lógico, mientras que en verde se han marcado los ficheros de salida. La estructura de todos los ficheros se puede consultar en Molina et al., 2010.

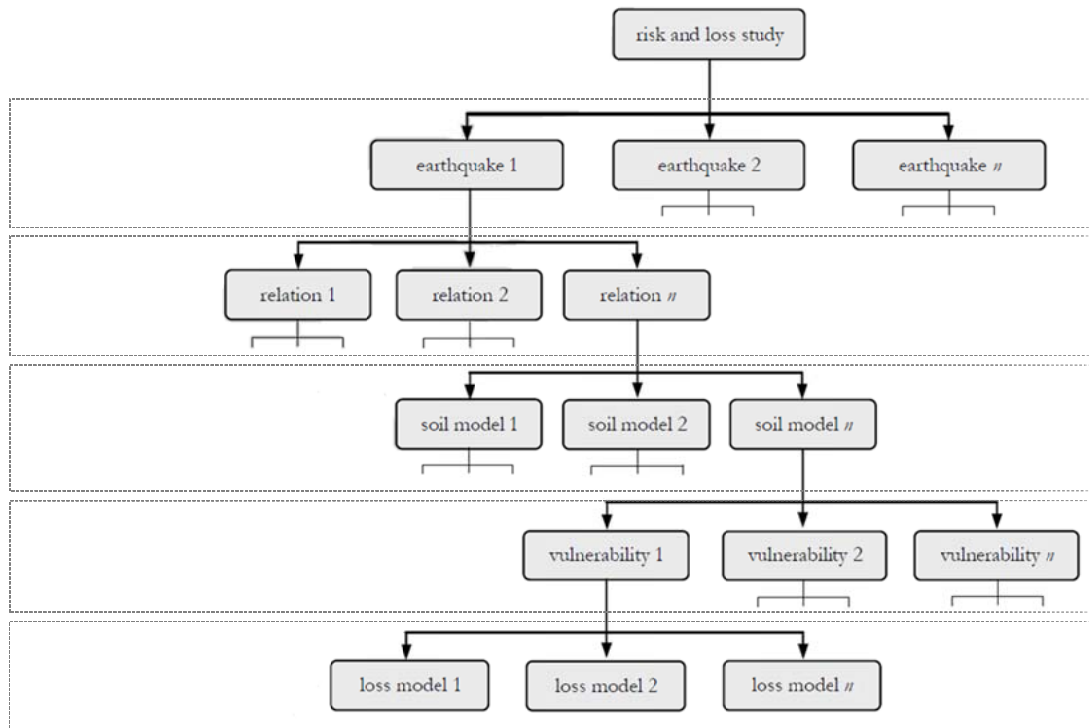
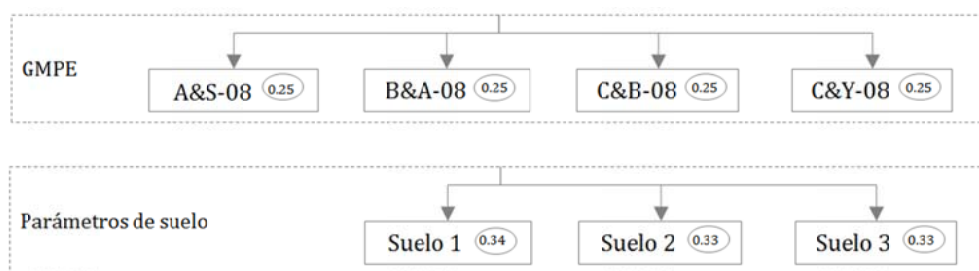


Figura 51. Estructura del árbol lógico del cálculo del riesgo sísmico con SELINA (modificado de Molina et al. 2010).

Siguiendo en la Figura 50 el flujo de las cajas enmarcadas en rojo, se puede ver que en primer lugar se calcula la componente “amenaza” del riesgo (Figura 36). Para ello se ha realizado un estudio determinista de la peligrosidad, que necesita como *inputs* el escenario sísmico y las leyes de atenuación (GMPE), y éstas, a su vez, necesitan los parámetros que describen el tipo de suelo. Estos *inputs* constituyen los tres primeros nodos del árbol lógico (Figura 51). En el caso de esta fase 1 de la calibración, sólo hay un escenario sísmico (ene-2010. Ver Tabla 7), por tanto, el nodo “parámetros del escenario sísmico” tiene una única rama con peso 1 (100%). Se trata del fichero *earthquake.txt*. Sin embargo, los otros dos nodos se han configurado de la siguiente manera (se indican también los pesos de cada rama rodeados con un círculo):



En el fichero *attenuation.txt* se configura el nodo “GMPE”, y se indica qué GMPE se quieren utilizar (ya están programadas en SELENA, por lo que el usuario no necesita aportarlas) y con qué peso entrarán en el árbol lógico. Por su parte, en el fichero *soilfiles.txt* se configura el nodo “parámetros de suelo”, indicándose cuáles son los archivos que contienen los parámetros indicadores del modelo de suelo en el centroide de cada geounidad (en este estudio, teniendo en cuenta los GMPE utilizados, esos valores han sido Vs30, Z_{1.0} y Z_{2.5}), con sus respectivos pesos.

Una vez que los ficheros de entrada han sido configurados, se procede al cálculo del movimiento fuerte que se representa por medio de espectros específicos que ya consideran el tipo de suelo, en cada centroide. Los ficheros de salida son los *gmotionceni.txt*, y contienen las aceleraciones espectrales que predice cada GMPE utilizado (el carácter i del nombre del fichero indica el GMPE).

La Figura 52 muestra los espectros específicos que se han obtenido en este estudio tras reproducir el escenario de enero de 2010 en los centroides de dos geounidades de la ciudad de Puerto Príncipe, con los cuatro GMPE utilizados. Se han escogido las geounidades en las que los modelos predicen los mayores y los menores movimientos fuertes, respectivamente, para dar una idea del rango de aceleraciones. Como puede apreciarse, para un mismo punto, los modelos de B&A y C&Y estiman menores aceleraciones que A&S y C&B.

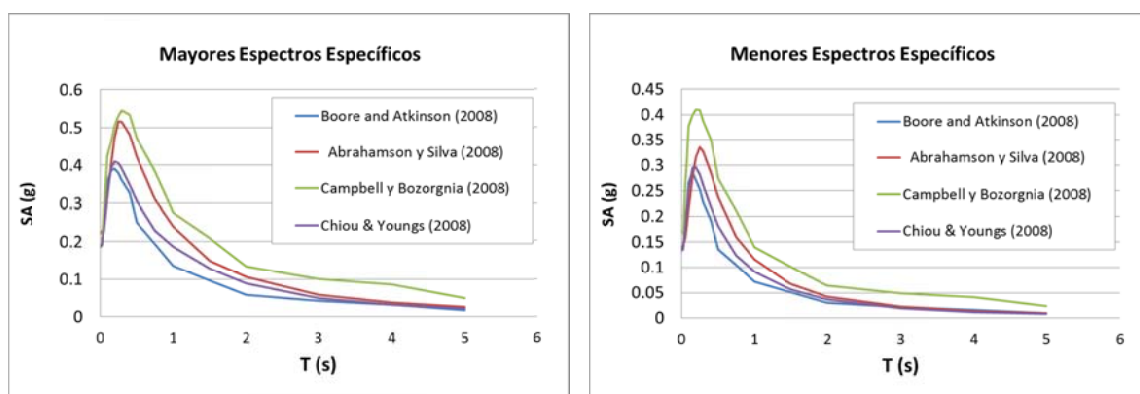


Figura 52. Espectros específicos calculados con distintos GMPE en los centroides de dos geounidades



El último paso del proceso ha sido estimar la probabilidad de que los edificios de la ciudad alcancen cada grado de daño a causa del movimiento fuerte del suelo en el centroide de la geounidad en que se encuentren. En este paso es necesario aportar al programa dos ficheros (Figura 50). Uno de ellos es *vulnerfiles.txt*, que indica cuáles son los archivos que contienen los parámetros de los espectros de capacidad (*capacity.txt*) y de las curvas de fragilidad (*fragility.txt*) asociados a cada tipología. En este estudio, sólo se ha utilizado un juego de funciones de daño, por lo que el nodo “funciones de daño” tiene sólo una rama con peso 1. El otro es el *numbuild.txt*, que contiene el número de edificios de cada tipología que hay en cada geounidad. Como ya se comentó en el apartado 0, en este fichero no se han incluido los edificios localizados en el Fuerte Nacional ni en pendientes abruptas, ya que los GMPE no tienen en cuenta el factor de amplificación por topografía, y en esos casos este factor juega un papel importante. A la hora de comparar el daño calculado con el observado, también se han excluido de la base de datos estos edificios, de manera que los datos sean comparables.

Con estos ficheros y los espectros específicos, SELENA calcula las probabilidades de daño aplicando el método analítico MADRS (*Modified Acceleration-Displacement Response Spectrum*) publicado por la FEMA (2005). Se trata de una mejora del clásico método capacidad-demanda desarrollado por el ATC (*Applied Technology Council*, 1996). SELENA, siguiendo el método MADRS (Figura 53), realiza un proceso iterativo en el que cruza el espectro de capacidad asociado a una tipología con el espectro de respuesta del suelo hasta obtener el punto de desempeño, que viene dado por el desplazamiento máximo espectral. Tiene en cuenta un comportamiento tanto lineal como no lineal de la estructura. Con el desplazamiento máximo, en las curvas de fragilidad, se obtienen las probabilidades de daño, como se ilustra en la Figura 54. SELENA proporciona este resultado en los ficheros *douti.txt*, donde el carácter i del nombre hace referencia a cada rama del árbol lógico (en este estudio han sido 12, obtenidas como combinación de las ramas de los nodos “GMPE” y “parámetros de suelo”).

Una vez obtenidas las probabilidades de daño por cada rama del árbol lógico, se calcula el número de edificios dañados a partir del fichero *numbuild.txt*, lo que SELENA presenta en el archivo *nobctdouti.txt* (como siempre, el carácter i del nombre representa la rama). Además, el programa calcula la media ponderada con los pesos de las ramas, y la media $\pm \sigma$ (son los ficheros *medianct.txt*, *16prctilect.txt*, *84prctilect.txt*). En el fichero *ltreewgth.txt* el programa presenta un resumen de los pesos de cada rama del árbol lógico configurado.

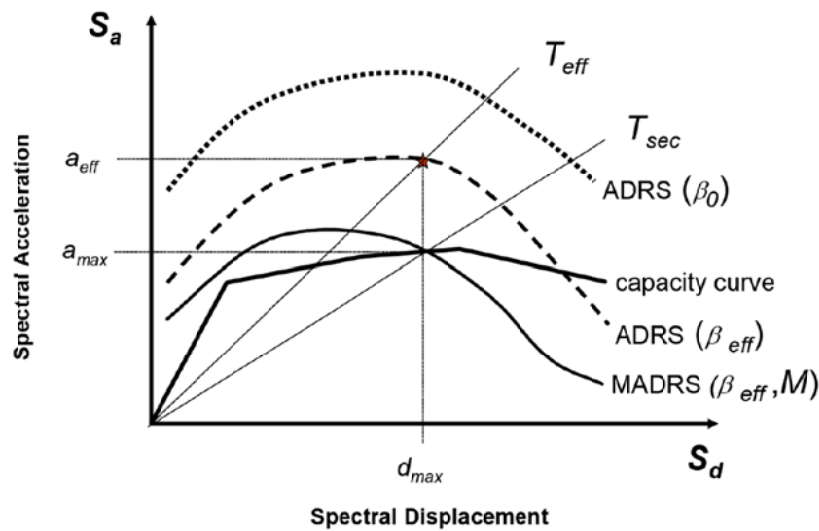


Figura 53. Esquema de obtención del punto de desempeño mediante el método MADRS (extraída de FEMA, 2005).

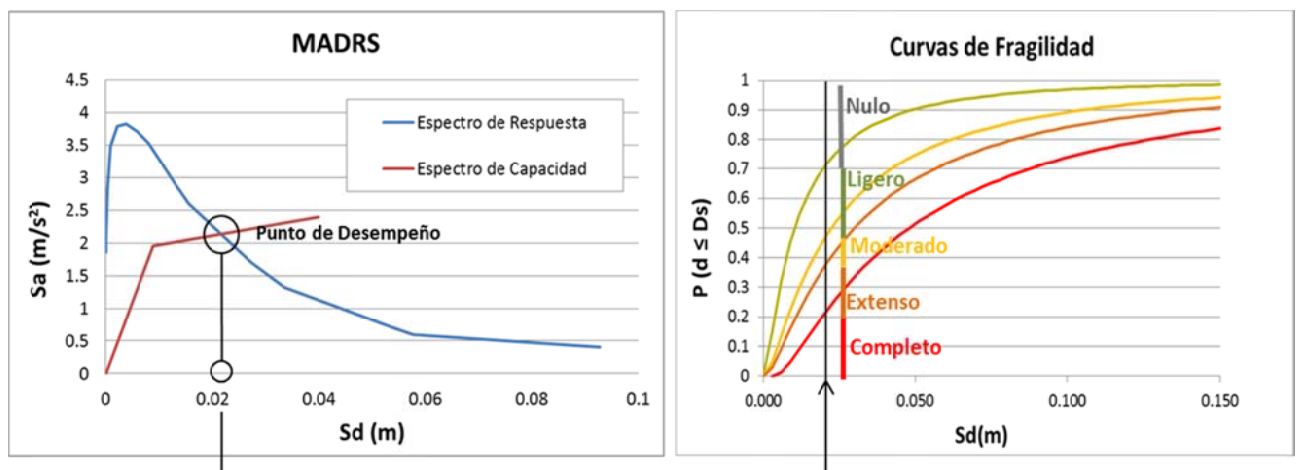


Figura 54. Esquema del cálculo de las probabilidades de daño a partir del desplazamiento máximo

9.3.1.2. Cálculo de los residuos y análisis de resultados

Para evaluar la calidad de los resultados obtenidos con cada rama del árbol lógico, se han comparado éstos con los daños observados en el terremoto de enero de 2010. Se han calculado los residuos como el número de edificios que alcanzan cada grado de daño estimado por el modelo (N_{calc}) menos el número de edificios que alcanzaron cada grado de daño en el sismo de 2010 (N_{obs}). Esto se ha hecho para cada tipología y se ha comprobado que prácticamente en todas ellas, los residuos siguen el mismo patrón. A modo de ejemplo se muestra en la Figura 55 esta comparación para la tipología RC-CB, la más representativa (el 75% de los edificios de la ciudad son de este tipo). Con un punto

rojo se muestra el daño observado en el sismo de 2010, y con otros símbolos (consultar leyenda) los daños estimados utilizando cada GMPE y el suelo 1 (valor medio de V_{s30}), que es uno de los que menores residuos porcentuales arroja, como se comentará más adelante (Tabla 9).

Como es posible comprobar, los modelos B&A y C&Y son los que se aproximan más a los datos observados. Se aprecia también que las diferencias entre los valores teóricos y los observados disminuyen conforme el grado de daño se hace mayor. Curiosamente, en todas las tipologías y con todas las ramas de cálculo, las mayores diferencias se obtienen en el daño ligero. Esto puede deberse a que este grado de daño observado está sobrestimado, es decir, que haya edificios con elementos no estructurales dañados por otras causas (mal estado de conservación, premonitores o réplicas) y se hayan atribuido al sismo principal del 12 de enero de 2010. No obstante, este resultado no es muy preocupante, ya que el objetivo final de este estudio es aportar información que oriente en la adopción de medidas para gestionar el riesgo (definir las labores de prevención y mitigación y las acciones de gestión de la emergencia), y éstas se basan en la magnitud de los daños más graves, no del daño ligero.

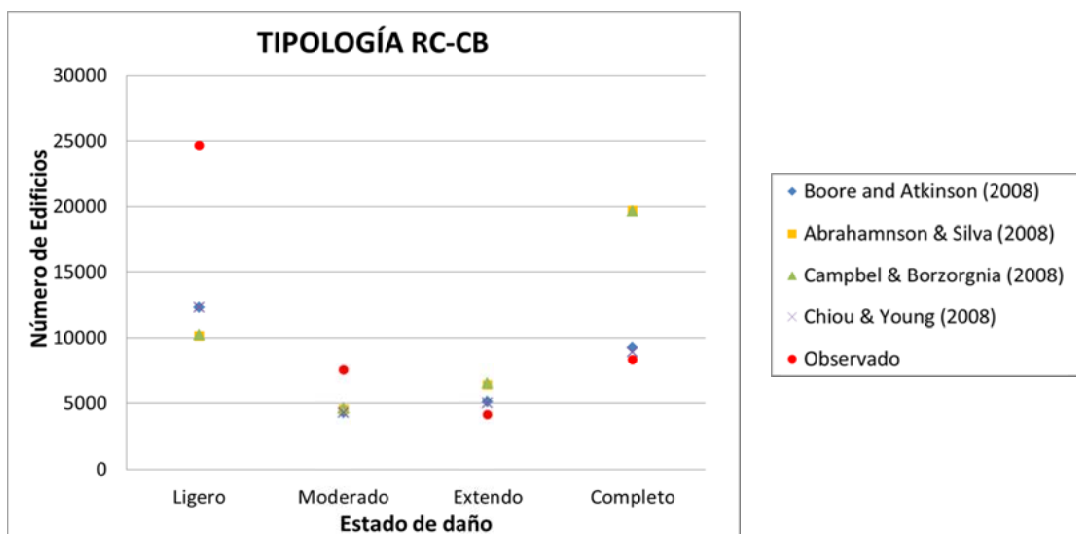


Figura 55. Comparación de los resultados de daño obtenidos con el modelo de cálculo propuesto

Para cuantificar el impacto que las diferencias existentes entre el daño calculado y el observado tienen en Puerto Príncipe, el residuo (obtenido como se ha explicado anteriormente) se ha expresado en porcentaje respecto del total de edificios de la tipología correspondiente en la ciudad. En la Tabla 9 se ha representado el valor de dicho porcentaje obtenido para la tipología RC-CB, para los dos modelos de movimiento del suelo que se ajustan mejor al daño observado (B&A y C&Y) y los tres tipos de suelo. Como puede observarse, los errores en los daños más graves son menores cuando el tipo de suelo seleccionado es el correspondiente a la velocidad media estimada (suelo 1) y a la

velocidad media estimada más 1 desviación estándar (suelo 3). El patrón es similar en las demás tipologías.

Tabla 9. Residuos porcentuales de daño obtenidos con el modelo de cálculo propuesto

Suelo	GMPE	Grado de daño en tipología RC-CB			
		Ligero	Moderado	Extenso	Completo
1	B&A	-24.60	-6.52	1.93	1.86
1	C&Y	-24.57	-6.60	1.74	1.13
2	B&A	-24.76	-5.98	3.05	6.24
2	C&Y	-24.85	-6.08	2.88	5.88
3	B&A	-24.84	-6.99	1.10	-0.78
3	C&Y	-24.99	-7.16	0.80	-1.65

Por tanto, de la fase 1 de la calibración se concluye que los GMPE más adecuados son B&A y C&Y, y los valores de Vs30 son la media y la media + σ .

9.3.2. Fase 2. Calibración de las funciones de daño

Con el fin de reducir los residuos porcentuales por debajo del umbral del 5%, se ha procedido a ajustar las funciones de daño propuestas a la realidad constructiva de Haití. Para ello, se ha seguido el proceso iterativo ya introducido mostrado en la Figura 49. Como ya se ha comentado, lo único que se ha ido variando en este proceso son los parámetros de los espectros de capacidad, por lo que a su vez se ven modificadas las curvas de fragilidad, ya que dependen de éstos (como se explicó en el apartado 0). En toda esta fase 2 de calibración, los daños se han calculado con los GMPE fijados en la fase 1 y con el suelo 1 (ya que es el valor más probable de Vs30).

La Figura 56 puede ayudar a comprender mejor este proceso. En ella se muestra en azul un ejemplo de espectro de capacidad propuesto, y se ha marcado el punto de fluencia (D_y , A_y), al que comienza el daño estructural, y el último (D_u , A_u), al que se produce el colapso. En líneas discontinuas se representa el espectro tras sufrir algunas de las modificaciones del proceso de calibración.

En primer lugar, y partiendo de la asunción de que los espectros de capacidad propuestos estarían sobrevalorando la capacidad de las construcciones de Haití, se ha reducido la aceleración máxima que soporta la estructura, es decir, la A_u pasa a A_u' . Este primer paso tiene el efecto de reducir también la A_y hasta A_y' en la mayoría de los espectros. Tras este primer cambio, y siguiendo el diagrama de flujo (Figura 49), se procede a recalcular las curvas de fragilidad, el daño y los residuos porcentuales. En ningún caso se han conseguido residuos menores del 5% con sólo bajar la A_u ; además, los

valores de los residuos, en general, presentaban cierta variabilidad según se tratara de un grado de daño u otro.

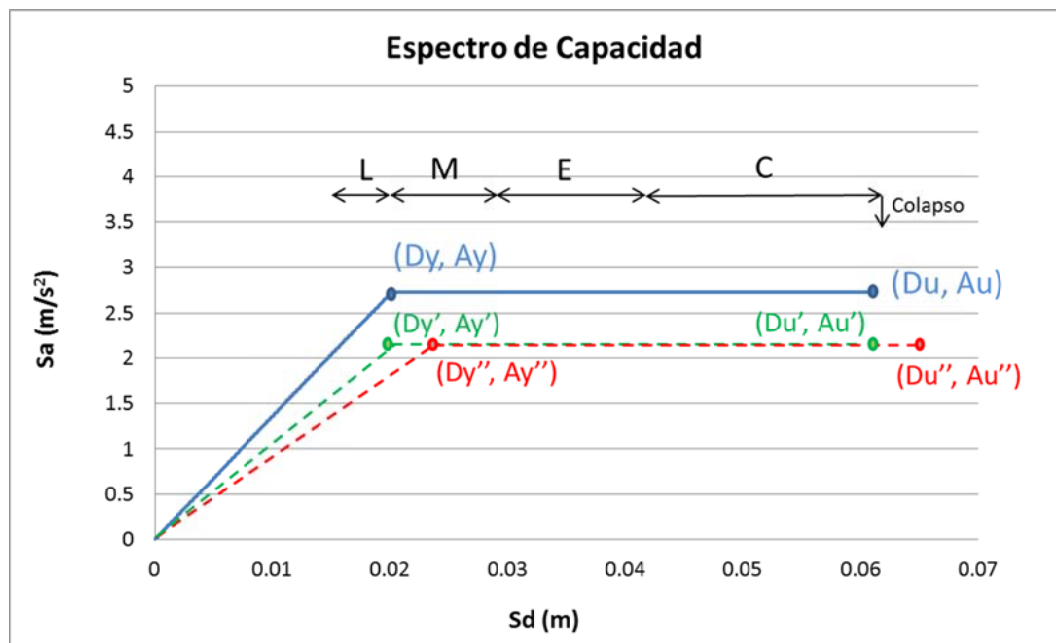


Figura 56. Ejemplo de espectro de capacidad original (línea continua) y calibrado (discontinua)

Por tanto, para resolver esto, se ha tratado de ajustar los puntos de fluencia y último en función del signo de los residuos correspondientes a los diferentes grados de daño. Así, dependiendo del signo del residuo obtenido en la iteración anterior para el daño moderado, se ha desplazado el punto (Dy', Ay') hacia la derecha (para reducir el daño moderado calculado) o a la izquierda (para aumentarlo). Esta modificación se ha hecho gradualmente de forma iterativa, calculando cada vez las curvas de fragilidad, el daño y los residuos, hasta que éstos han quedado bajo el umbral del 5%.

Finalmente, se ha procedido a modificar el punto último en los espectros donde los residuos de daño completo superaban el umbral, desplazándose hacia derecha o izquierda con el mismo criterio que con el punto de fluencia. Del mismo modo, se ha procedido gradualmente, calculando cada vez todo lo necesario hasta obtener los residuos y que éstos fueran menores que el umbral. En la Tabla 10 se presentan los residuos porcentuales finales tras la calibración, para las seis tipologías, obtenidos con los dos GMPE y el suelo 1. Como se puede apreciar, los residuos correspondientes a los grados de daño mayores son inferiores al 5%. En el caso del daño ligero, como ya se ha comentado, los modelos están prediciendo daños menores que los observados.



Tabla 10. Resumen de los residuos porcentuales obtenidos tras calibrar las funciones de daño

MBT	GMPE	Grado de daño			
		Ligero	Moderado	Extenso	Completo
RC-SW	B&A	-25.05	0.42	0.85	-0.74
	C&Y	-25.27	-0.11	0.42	-1.91
RC-CB	B&A	-24.77	-0.98	2.89	0.24
	C&Y	-24.67	-1.11	2.68	-0.45
RC-UM	B&A	-32.27	0.41	-2.52	0.99
	C&Y	-32.27	0.45	-2.30	1.89
RL-BM	B&A	-16.84	-4.78	0.30	-2.11
	C&Y	-17.22	-4.72	0.65	-0.33
URM1	B&A	-35.36	2.74	-0.67	-1.28
	C&Y	-35.48	3.16	-0.24	0.12
URM2	B&A	-27.34	-2.62	-0.54	-1.04
	C&Y	-27.53	-2.42	0.05	1.09

Este proceso iterativo ha resultado muy largo y tedioso, pero finalmente se han conseguido unos espectros de capacidad para las tipologías constructivas definidas para Puerto Príncipe calibrados con datos reales. Este resultado será de gran utilidad, pues junto con los GMPE y los suelos 1 y 3 elegidos en la fase 1, se podrán calcular escenarios de riesgo por sismos futuros en Puerto Príncipe.

Los espectros de capacidad calibrados se muestran, junto a los espectros propuestos a priori, en la Figura 57. Y en la Tabla 11 se listan los parámetros de los espectros de capacidad calibrados, para las seis tipologías, tanto de baja como de media elevación.

Tabla 11. Parámetros de las funciones de daño calibradas en este estudio (continúa en la siguiente página).

MBT	Dy (m)	Ay (m/s ²)	Du (m)	Au (m/s ²)
RC-SW-L	0.025	1.570	0.090	1.570
RC-SW-M	0.037	0.937	0.135	0.937
RC-CB-L	0.013	1.800	0.047	1.800
RC-CB-M	0.019	1.080	0.071	1.080
RC-UM-L	0.006	2.107	0.033	2.107
RC-UM-M	0.009	1.264	0.050	1.264
RL-BM-L	0.005	1.800	0.017	1.800
RL-BM-M	0.011	1.422	0.025	1.422

MBT	Dy (m)	Ay (m/s ²)	Du (m)	Au (m/s ²)
URM1-L	0.004	2.478	0.018	2.478
URM1-M	0.009	1.958	0.028	1.958
URM2-L	0.002	1.900	0.010	1.900
URM2-M	0.006	1.501	0.0156	1.501

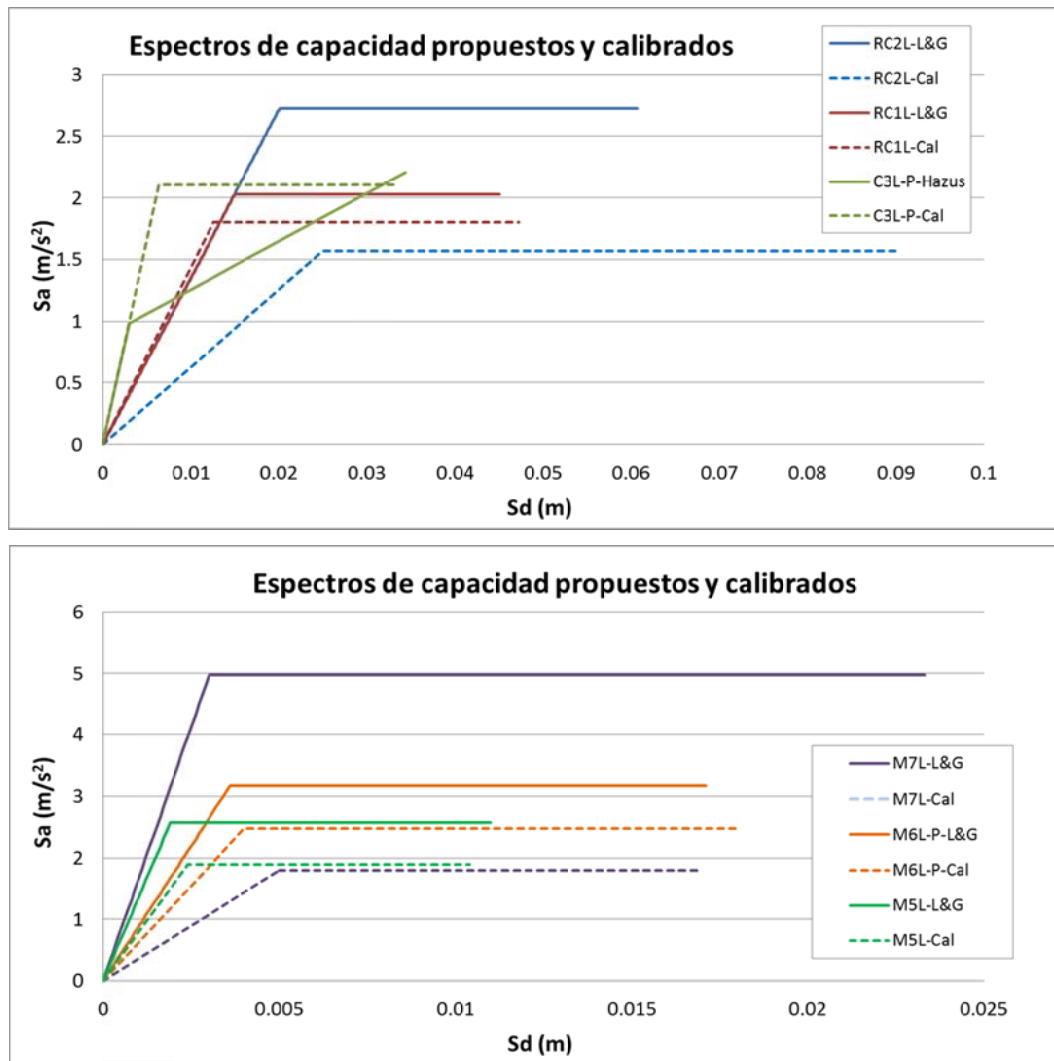


Figura 57. Espectros de capacidad propuestos (línea continua) y calibrados (línea discontinua)

Por último, se han calculado también las curvas de fragilidad, con los parámetros de los espectros de capacidad calibrados, para cada tipología. En la Figura 58 se muestran estas curvas de fragilidad para las seis tipologías de baja elevación:

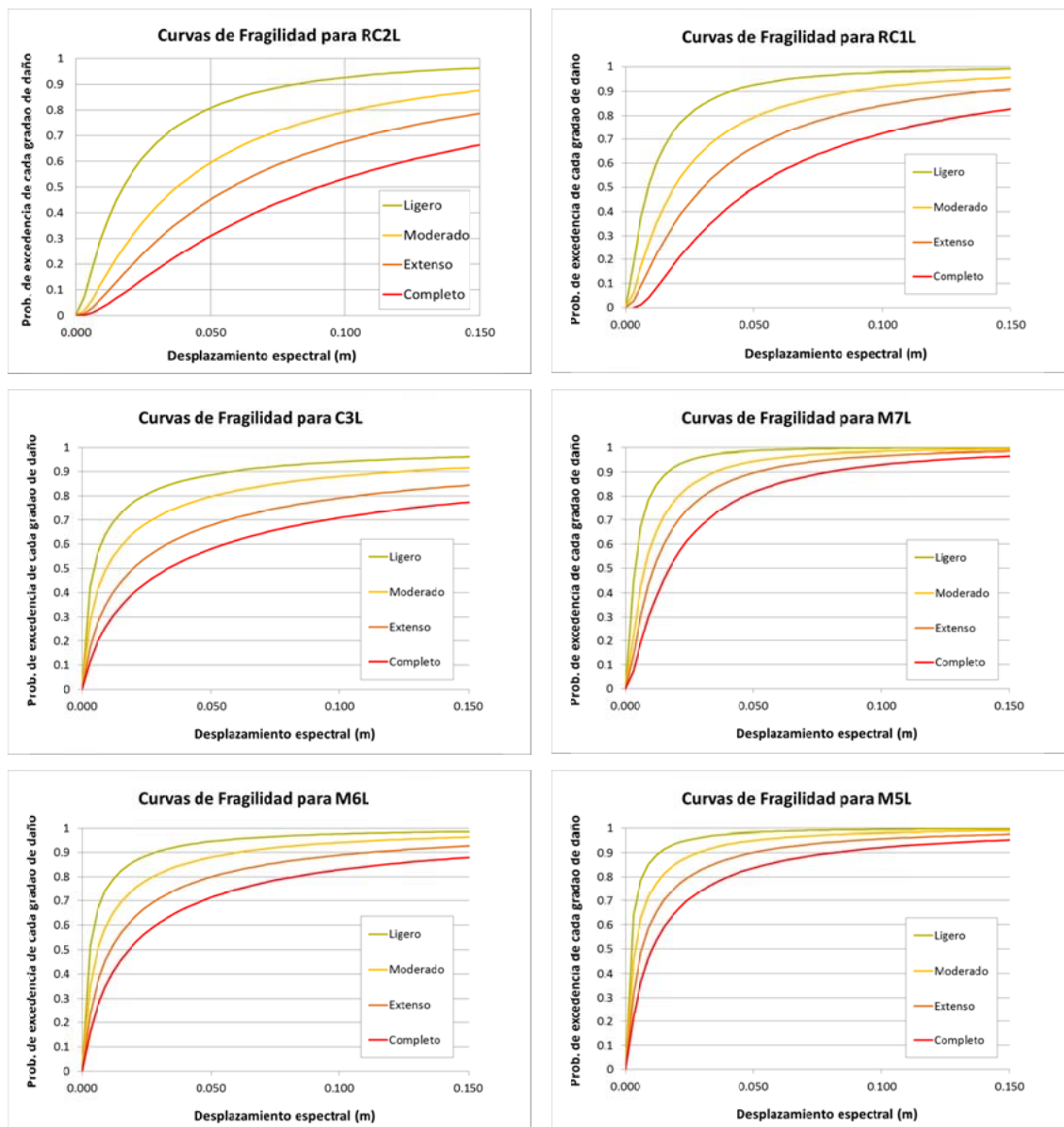


Figura 58. Curvas de fragilidad calibradas

9.4. Cálculo del riesgo sísmico con el modelo calibrado y análisis de resultados

Cálculo del riesgo sísmico

Una vez calibrado el modelo de cálculo de riesgo sísmico para Puerto Príncipe, resulta de interés realizar una aplicación para obtener un escenario de daños por sismos futuros, de forma que los responsables de la toma de decisiones en materia de gestión de este riesgo natural, puedan hacerse una idea de la dimensión de una posible catástrofe e idear los medios para minimizarla. Con este fin, se ha llevado a cabo una estimación de daños simulando en SELINA el escenario sísmico determinista Matheux-Neiba (Tabla 7).



Los ficheros de entrada han sido:

- *earthquake.txt*: con los parámetros del escenario Matheux-Neiba
- *attenuation.txt*: en este nodo del árbol lógico se ha indicado que se utilizarán los dos GMPE elegidos (B&A y C&Y), con un peso del 50% cada uno.
- *soilfiles.txt*: en este nodo se ha hecho referencia a los archivos de suelo 1 (Vs30 media) y 3 (Vs30 media + σ), pesados también al 50%.
- *vulnerfiles.txt*: en este fichero se han indicado los nombres de los archivos que contienen los parámetros de las funciones de daño calibradas. Como se tiene sólo una función por tipología, este nodo tiene una única rama con peso 100%.
- *numbuild.txt*: este archivo contiene el número de edificios de cada tipología por geounidad. Se ha elaborado a partir de la base de datos del MOP y sólo se han tenido en cuenta aquellos edificios que experimentaron daño moderado, ligero y nulo en el terremoto de 2010. Resultan un total de 56.692 edificios. Quedan, por tanto, fuera de este estudio los edificios con daños severo y completo, puesto estarán demolidos o en proceso de reconstrucción o reparación. Cuando estas labores finalicen, se debería actualizar la base de datos del catastro para incorporarlos, y se podría también actualizar este cálculo.

El árbol lógico, en este caso, tiene un total de 4 ramas. Tras ejecutar SELENA, se han obtenido los ficheros siguientes:

- *gmotionceni.txt*: es el fichero de movimiento fuerte que causaría el terremoto simulado. Contiene las ordenadas de los espectros específicos de respuesta calculadas por cada rama en el centroide de cada geounidad.
- *douti.txt*: este archivo contiene las probabilidades de daño para cada tipología calculadas con cada rama.
- *nobctdouti.txt*: a partir de las probabilidades de daño y el número de edificios introducido en el *numbuild.txt*, se calcula por cada rama, el número de edificios de cada tipología que alcanzarían cada grado de daño y se presenta en este archivo.
- *medianct.txt*, *16prctilect.txt*, *84prctilect.txt*: son los ficheros que contienen la media del número de edificios dañados (tras ponderar los resultados obtenidos por cada rama con sus pesos correspondientes) y la media \pm la desviación estándar.
- *ltreewgth.txt*: presenta los pesos asociados a cada rama del árbol lógico.

Análisis de resultados

Los resultados que se muestran a continuación se corresponden con la media ponderada (archivo *medianct.txt*), es decir, no se presentan los resultados arrojados por cada rama del árbol lógico. Un resumen se muestra en la Tabla 12, donde aparece la media \pm la desviación estándar del número de edificios que se espera alcancen cada grado de daño (obtenida a partir de los archivos *16prctilect.txt* y *84prctilect.txt*), así como el porcentaje respecto del total de edificios de la tipología correspondiente (la Figura 59 muestra un gráfico de estos porcentajes). Asimismo, los resultados más interesantes se han representado también en mapas para facilitar su lectura.

Tabla 12. Resumen de daños del escenario Matheux-Neiba: número de edificios de cada tipología que se espera alcancen cada grado de daño.

TIPOLOGÍA							
Daño	RC-SW	RC-CB	RC-UM	RL-BM	URM1	URM2	TOTAL
Nulo	359 \pm 27	14.582 \pm 907	740 \pm 26	1.897 \pm 114	682 \pm 21	494 \pm 23	18.754
	(41%)	(34%)	(38%)	(26%)	(39%)	(33%)	
Ligero	206 \pm 4	10.613 \pm 84	291 \pm 3	1.697 \pm 32	289 \pm 4	276 \pm 10	13.372
	(24%)	(24%)	(15%)	(23%)	(17%)	(18%)	
Moderado	108 \pm 9	6.111 \pm 150	273 \pm 8	899 \pm 13	225 \pm 7	208 \pm 4	7.824
	(12%)	(14%)	(14%)	(12%)	(13%)	(14%)	
Extenso	85 \pm 13	4.825 \pm 220	170 \pm 6	912 \pm 28	158 \pm 6	155 \pm 8	6.305
	(10%)	(11%)	(9%)	(13%)	(9%)	(10%)	
Completo	116 \pm 19	7.282 \pm 610	469 \pm 21	1.817 \pm 107	386 \pm 23	367 \pm 23	10.437
	(13%)	(17%)	(24%)	(25%)	(22%)	(25%)	

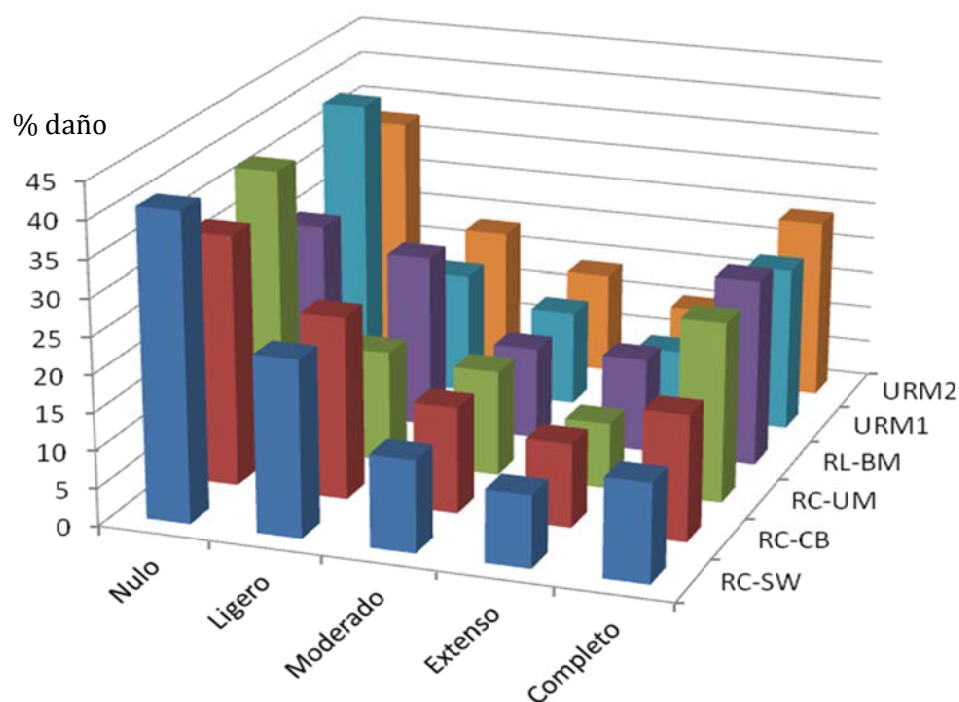


Figura 59. Diagrama de porcentajes de daño

Podría elaborarse un gran número de mapas para representar todos los grados de daño de todas las tipologías. No obstante, con el fin de hacer llegar al lector la información más relevante de la manera más rápida posible, se ha decidido crear los siguientes mapas:

- Mapa de daños esperados para la tipología más representativa, RC-CB (Figura 60)
- Mapa de índice de daño medio, considerando todas las tipologías (Figura 61). Este parámetro da una idea general del grado de daño que se alcanzaría si ocurriese el terremoto simulado.

$$Dm = \sum_{j=1}^n d_j N_j / N$$

donde:

- Dm es el índice de daño medio
- N_j es el número de edificios con daño d_j
- N el número total de edificios
- n el número de grados de daño considerados. Para poder utilizar el grado de daño en la ecuación, se ha hecho la siguiente equivalencia:
 - daño nulo = 0
 - daño ligero = 1
 - daño moderado = 2

- daño extenso = 3
- daño completo = 4

Por tanto, Dm varía entre 0 y 4.

- Mapa de edificios inhabitables, considerando todas las tipologías (Figura 62). Éste parámetro se ha calculado como el 100% de los edificios que alcanzarían daño completo más el 90% de los que alcanzarían daño extenso, siguiendo las expresiones empíricas desarrolladas para Risk-UE (Vacareanu et al, 2004. W07, p18):

$$N_{\text{min inh}} = N \cdot PC + N \cdot PE \cdot 0,9$$

donde:

- Nmin inh es el número mínimo de edificios inhabitables
 - N es el número de edificios
 - PC y PE son las probabilidades de daño completo y extenso, respectivamente.
- Mapa de edificios inhabitables y distribución de los sistemas de emergencias (Figura 63).

De esta forma, en pocos mapas, se describe la situación en que quedaría la ciudad si ocurriera un terremoto de Mw 7,0 en la falla Matheux-Neiba. Puede verse la distribución espacial de los daños y su alcance, lo que da una idea de la magnitud de la catástrofe.

Analizando la Tabla 12 (y la Figura 59) se puede comparar el comportamiento de las distintas tipologías. Se observa que la RC-SW es la que mejor se comporta, seguida muy de cerca por la más representativa, la RC-CB. El mismo patrón se observó en el sismo de 2010 (Tabla 2), aunque con porcentajes de daño algo más altos, debido a que el epicentro era más cercano. El resto de tipologías sufren daños mayores, especialmente colapsos, que rondan el 20-25 %, siendo la RL-BM y la URM2 las menos resistentes (como también ocurriera en 2010).

En general, ante el escenario de Matheux-Neiba, todas las tipologías siguen un patrón parecido: el mayor daño es el nulo y va decreciendo hasta el extenso, donde de repente se eleva el número de colapsos (Figura 59).

En cuanto a los mapas, su gran aportación consiste en que permiten ver la distribución espacial de los daños. El primero de ellos (Figura 60) muestra los porcentajes de daño de la tipología RC-CB disgregados por geounidades. De esta forma se puede apreciar que, aunque se mantiene en general el patrón anteriormente comentado, en las áreas de las montañas del norte y del sur, el daño nulo predomina sobre los demás. Es decir, sufren menos daño en esas zonas. En cambio, en las geounidades localizadas en el centro de la ciudad y en la zona portuaria, el daño completo aumenta considerablemente, llegando a



superar al ligero. Esto se debe a la influencia del efecto local por tipo de suelo, ya que estas geounidades se encuentran en suelos blandos (Figura 48).

Es necesario recordar que el daño calculado en las áreas de montaña no está incluyendo el efecto topográfico, por lo que estos resultados de daño hay que tomarlos como un umbral inferior, es decir, como un mínimo. Por tanto, hay que tener en mente que la realidad podría superar esta estimación, especialmente en zonas de relieves prominentes.

En la Figura 61 se muestra el índice de daño medio, que da una idea global del grado de daño, y como se puede ver, el máximo es daño medio 2, es decir, daño moderado.

En el mapa de edificios inhabitables (Figura 62) se puede ver que el porcentaje respecto del total de edificios sometidos a estudio, varía entre el 30-50%, alcanzándose los mayores porcentajes, de nuevo, en las zonas de mayor amplificación local por tipo de suelo. En este mapa, se ha incluido también el valor absoluto, para dar una idea del número de edificios inhabitables neto. Estas cifras, en la mayoría de las geounidades, son de varios cientos, lo que proporciona una idea general de la magnitud de la catástrofe. En las geounidades situadas al sur de la ciudad, en las laderas de las montañas, se alcanzan las mayores cifras, pero no hay que perder de vista que también son los distritos con mayor número de edificios (Figura 40).

Todos estos resultados y mapas pueden utilizarse como una herramienta muy útil para diseñar medidas de prevención y mitigación del riesgo sísmico, y de planificación de la emergencia. Un ejemplo de ello es el mapa de la Figura 63, donde se han representado los servicios de emergencia y los centros de salud, que son dos de los sistemas más importantes con que cuenta una ciudad para hacer frente a la situación de emergencia que tiene lugar tras un terremoto. Se han representado junto con el porcentaje de edificios inhabitables, para que se mantenga la distribución espacial de los daños y puedan analizarse conjuntamente. Como se aprecia en el mapa, la mayoría de estas instalaciones se encuentran en las geounidades donde se espera que ocurran los mayores daños. Se trata de las zonas donde se esperan mayores amplificaciones por geología. Ante esta situación, el gobierno haitiano podría plantearse reforzar estas instalaciones para garantizar que queden operativas después de un sismo. Asimismo, se puede ver cómo el número de centros de salud, y especialmente, de servicios de emergencia, disminuye hacia las áreas de montaña del norte y del sur de la ciudad. Como ya se ha visto en este estudio, esas áreas tienen peor calidad constructiva y una ordenación urbana muy precaria o inexistente (Figura 34), lo que da una idea del caos que podría generarse en caso de terremoto. Ante este hecho, se podría pensar en abrir vías de acceso rápido a esas áreas de la ciudad, para garantizar la llegada a tiempo de los servicios de salud y emergencias, y facilitar las evacuaciones.

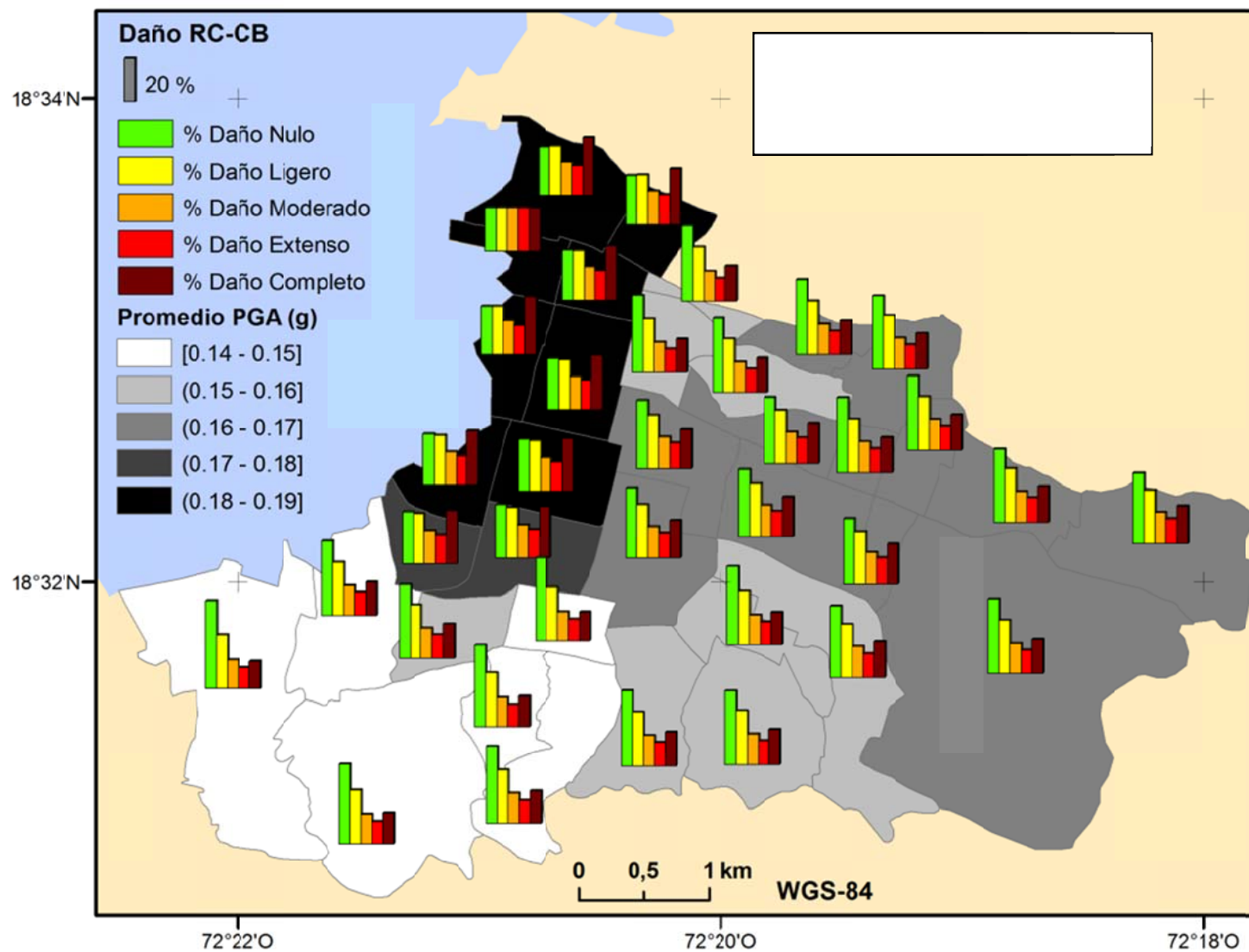


Figura 60. Mapa de daños esperados en la tipología RC-CB

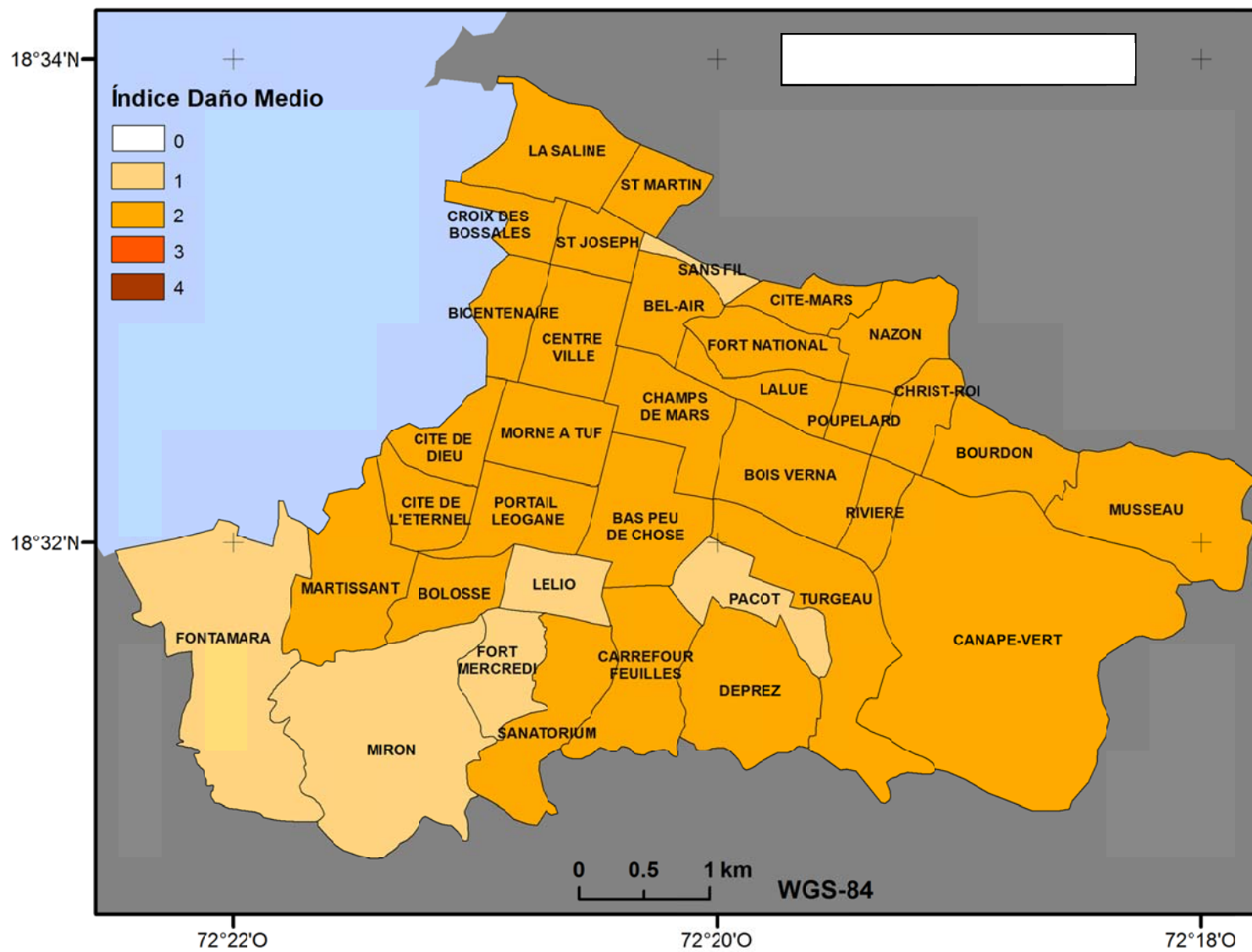
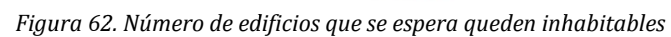


Figura 61. Mapa de índice de daño medio



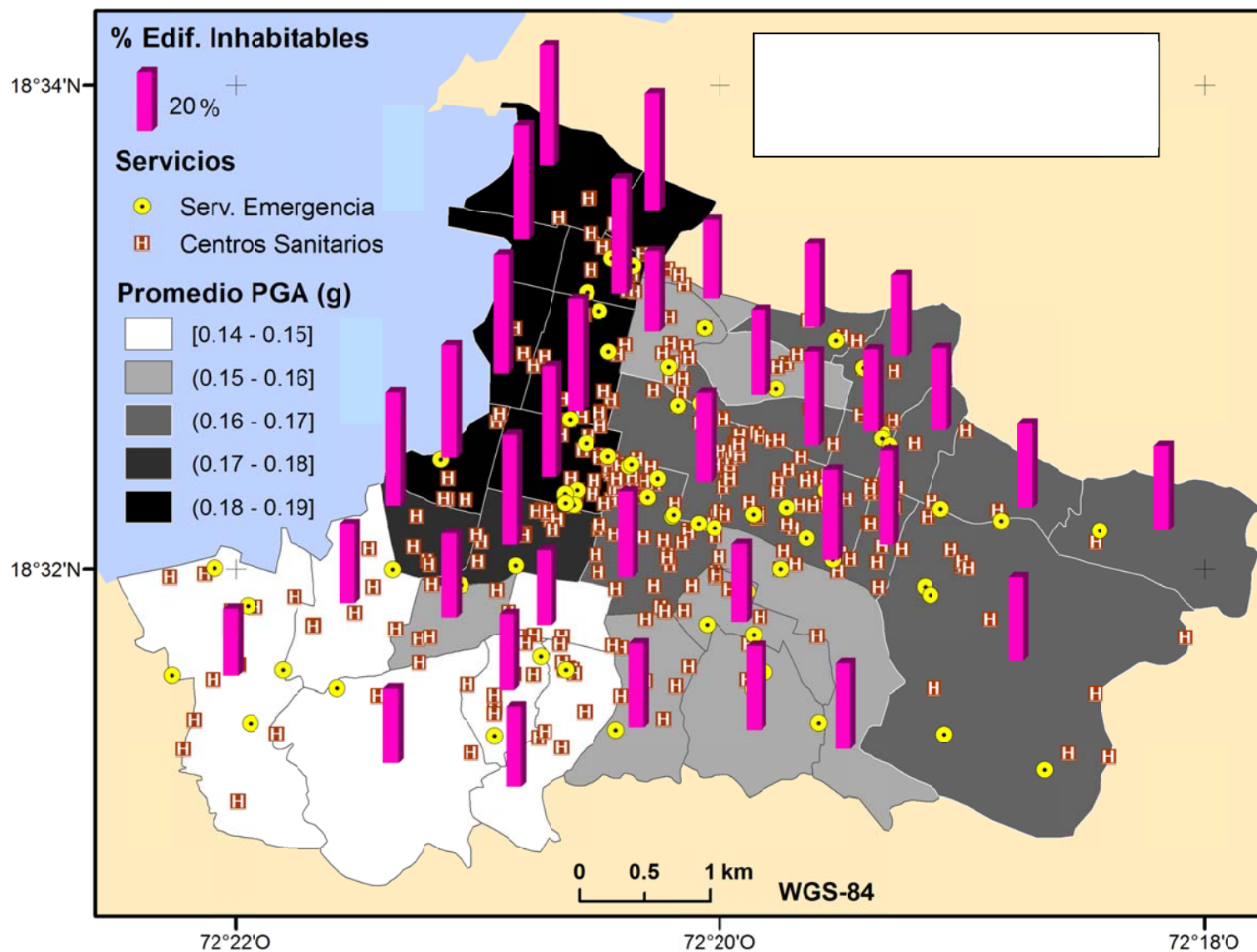


Figura 63. Localización de los servicios de emergencia y los centros sanitarios en relación con los daños



10. Conclusiones

Se ha llevado a cabo un completo estudio de riesgo sísmico en Puerto Príncipe, cuyos resultados han sido transferidos al gobierno haitiano para que puedan ser utilizados en la definición de los planes de emergencia ante este tipo de riesgos en la ciudad. A continuación se presenta un resumen de sus fases, los logros alcanzados con su ejecución y las conclusiones a las que se ha llegado:

- Se ha recopilado información referente a los daños causados por el terremoto de 2010 e investigaciones posteriores relacionadas con ello, y se ha analizado para conocer las prácticas constructivas locales y comprender las causas de los fallos en las estructuras durante dicho terremoto. De esta forma se ha llegado a la conclusión de que la explicación de la catástrofe se encuentra, principalmente, en la **baja calidad de las construcciones haitianas**. Asimismo, esta parte del estudio servirá de base para la definición de medidas de reforzamiento que se está llevando a cabo en el proyecto Sismo-Haití II, continuación del proyecto Sismo-Haití, en el que se enmarca el presente TFM.
- Se ha implementado un **SIG** donde se ha homogeneizado y organizado toda la información recopilada en este estudio, así como los resultados obtenidos. Contiene la base de datos de los edificios de Puerto Príncipe, imágenes de satélite, un modelo digital del terreno, estructuras tectónicas, límites administrativos, un mapa geológico y geotécnico, capas de hidrología, carreteras, equipamientos urbanos y todas las capas generadas en éste y anteriores estudios del grupo GIIS: catálogo sísmico, fallas activas, peligrosidad sísmica regional, microzonación, vulnerabilidad y riesgo sísmico. Este completo SIG se proporcionará a todas las instituciones haitianas interesadas (MOP, Ministerio de Medioambiente, Buró de Minas, Laboratorio de los Edificios, Facultad de Ciencias...).
- Se ha realizado un estudio del posible **efecto local**, y se han identificado los distritos de la ciudad donde confluyen graves daños con relieve prominente (áreas montañosas del norte y del sur) y/o suelo blando (área portuaria y centro de la ciudad). Estas zonas se han considerado de alto peligro y se han delimitado para que sean tenidas en cuenta en la definición de los planes urbanísticos durante la reconstrucción (Figura 35).
- Se ha estudiado el parque inmobiliario de Puerto Príncipe *in situ* con la colaboración de ingenieros civiles locales. Con ello se ha conseguido identificar los edificios más característicos de la ciudad y, posteriormente y con ayuda de una base de datos facilitada por el MOP que contiene las características estructurales de todos los edificios, se ha realizado la clasificación de tipologías constructivas. El resultado de esta fase ha sido una descripción de las **seis tipologías** identificadas, acompañadas

por fotografías, y los **espectros de capacidad y curvas de fragilidad** que, a priori, mejor caracterizan su vulnerabilidad (Tabla 2 Tabla 3). Estas funciones se han seleccionado de Lagomarsino y Giovinazzi (2006), principalmente, y de HAZUS (FEMA 2003). Además, se ha acompañado de un mapa donde se muestra su distribución espacial (Figura 42. Distribución espacial de las tipologías constructivas en Puerto Príncipe).

- Durante la campaña de campo con técnicos locales se les proporcionó **formación** para que pudieran identificar cuáles son las características de los edificios que influyen en su vulnerabilidad. De esta manera, con los cuestionarios de campo que se elaboraron, se pueden replicar estudios similares en otras ciudades.
- Se ha realizado una tabla comparativa (Tabla 8) que recoge las características de los modelos de atenuación más actuales que se adaptan a la zona de estudio: **Abrahamson y Silva (2008), Boore y Atkinson (2008), Campbell y Bozorgnia (2008) y Chiou y Youngs (2008)**. Este resumen, además, facilitará el trabajo en futuros estudios de peligrosidad y riesgo sísmico en el Caribe.
- Con la clasificación del parque inmobiliario de Puerto Príncipe en tipologías constructivas y con los modelos de atenuación que se han escogido, se ha reproducido el escenario del terremoto de enero de 2010 con el programa SELENA. Comparando los resultados obtenidos con los daños reales, se han podido **calibrar** los *inputs* y ajustar las funciones de daño para que representen adecuadamente el comportamiento de las estructuras de la ciudad (Figura 57), así como determinar cuáles son los modelos que mejor representan la atenuación de la energía en el área de estudio.

Finalmente, el **modelo de cálculo de riesgo sísmico que se propone** para Puerto Príncipe (extrapolable a otras ciudades de características constructivas y geotécnicas similares) tras la realización de este estudio, es el siguiente:

- Modelos de movimiento fuerte del suelo: Boore y Atkinson (2008) y Chiou y Youngs (2008)
- Valor de V_{s30} : la media y la media + la desviación estándar, extraídos de Cox et al (2011).
- Tipologías (Tabla 2):
 - RC-SW
 - RC-CB
 - RC-UM
 - RL-BM
 - URM1
 - URM2
 - W1 y ST-CB: se necesitan más datos para poder realizar una calibración más fiable.



- Vulnerabilidad: las funciones de daño calibradas, cuyos parámetros se presentan en la Tabla 11.
- Aplicando el modelo de cálculo calibrado, se ha estimado el riesgo sísmico en la ciudad de Puerto Príncipe simulando el escenario Matheux-Neiba (terremoto superficial de Mw 7,0, a 40km al noreste de la ciudad). El parque actual de edificaciones de la ciudad muestra una **alta vulnerabilidad**, por lo que, dicho escenario u otro similar, afectaría de una manera significativa a la ciudad dando lugar a daño extenso en, al menos, un **30% y un 50%** de edificios, que quedarían, por tanto, **inhabitables**.

La distribución de daños en el entorno urbano es bastante uniforme debido a la amplificación del movimiento del suelo como consecuencia de la geología local en las geounidades más alejadas al evento simulado, y al mayor movimiento del suelo en las geounidades más próximas a la zona de ruptura. Teniendo en cuenta la ubicación de los centros sanitarios y de emergencia, se pone de manifiesto la dificultad que esta distribución de daños crearía en la gestión de las emergencias.

Esta estimación de daños supone un umbral inferior de lo que ocurriría en realidad, puesto que está **infraestimando los daños** en las áreas de montaña, ya que los modelos de movimiento fuerte utilizados en este estudio no tienen en cuenta el efecto topográfico.

Si no se trabaja en el refuerzo de estructuras y en la reconstrucción de las ciudades afectadas, siguiendo una normativa sismorresistente y un plan de ordenación urbana, de forma que se reduzca la alta vulnerabilidad de las construcciones de Haití, el riesgo sísmico seguirá siendo alto y la catástrofe se repetirá en el futuro.

Tras hacer llegar estos resultados a las autoridades competentes, es necesario que se trabaje en promover estas iniciativas y en concienciar a toda la población de que hay que estar protegido para hacer frente al peligro, porque éste no va a desaparecer.



11. Planificación temporal y económica del estudio

Dado que este TFM es parte de un proyecto de cooperación más completo, llevado a cabo por un grupo de investigadores multidisciplinar y con un presupuesto muy ajustado, la planificación temporal y económica que se presenta en este documento se ha preparado ex profeso, como si de un proyecto real se tratase.

En la matriz de planificación (Tabla 13) se exponen detalladamente las tareas realizadas para alcanzar los objetivos propuestos, con sus recursos (humanos y materiales) asignados y la distribución temporal. A continuación, en la Tabla 14 se indican los costes de estos recursos y el presupuesto total del estudio. Por último, en la Figura 64, se muestra un diagrama con la distribución de estos costes.

Se ha tenido en cuenta que, en las visitas a Puerto Príncipe, los acompañantes locales son voluntarios y se alquila un vehículo con conductor.

Tabla 13. Matriz de planificación del estudio *NOTA: I.G.C.: Ingeniero en Geodesia y Cartografía; I.C.: Ingeniero Civil; PC.: ordenador personal*

ACTIVIDADES	RECURSOS HUMANOS	RECURSOS MATERIALES	DISTRIBUCIÓN TEMPORAL (6 meses por semanas)
Recopilación de información	1 I.G.C.	1 PC	[1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4]
Implementación del SIG	1 I.G.C.	1 PC	[1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4]
Estudio de los daños de 2010	1 I.G.C.	1 PC	[1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4]
Visita a Puerto Príncipe para toma de datos (considerar vuelos y dietas)	1 I.G.C., 1 I.C. (con acompañantes locales)	Vehículo (con chófer), 2 PC, cámara de fotos y material de papelería	[1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4]
Clasificación de tipologías y asignación de funciones de daño	1 I.G.C. y 1 I.C.	2 PC	[1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4]
Calibración del modelo	1 I.G.C. y 1 I.C. (asesoría: experto en efecto local)	2 PC	[1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4]
Cálculo del riesgo sísmico	1 I.G.C. (asesoría: geología y sismicidad)	1 PC	[1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4]
Edición del informe	1 I.G.C.	1 PC, impresora y material de papelería	[1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4]
Entrega de resultados a las autoridades haitianas competentes (considerar vuelos y dietas)	1 I.G.C., 1 I.C.	Vehículo (con chófer), 1PC	[1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4] [1 2 3 4]

Tabla 14. Resumen de costes y coste total

RECURSOS	COSTE (€)
Rec. Humanos	
1 I.G.C (6 meses)	14.000
1 I.C (4 meses)	10.000
Asesor en efecto local	2.000
Asesor en geología y sismicidad	2.000
Rec. Materiales	
2 PC	1.400
Impresora	300
Cámara de fotos	150
Material de papelería	200
Viajes y dietas	
Vuelos (2 ida y vuelta, 2 personas)	4.800
Dietas y alojamiento (4 semanas, 2 personas)	3.600
Vehículo (con conductor, 1 mes)	2.000
Total ejecución material	40.450
Impuestos (19% de G.G y B.I + 21% I.V.A.)	16.180
PRESUPUESTO TOTAL DEL ESTUDIO	56.630

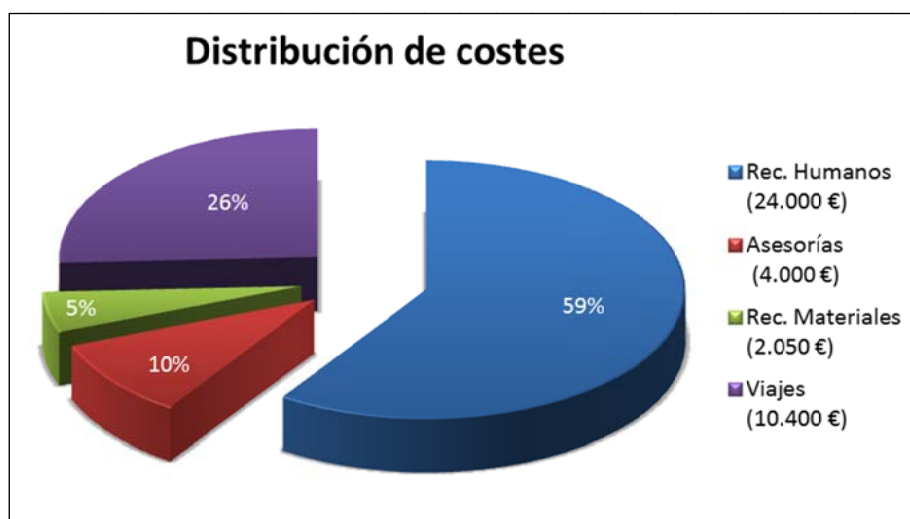


Figura 64. Distribución de costes de ejecución del estudio

El coste total de este estudio, habiendo considerado recursos humanos y materiales así como viajes, asciende a CINCUENTA Y SEIS MIL SEISCIENTOS TREINTA EUROS.



12. Líneas futuras

Sería conveniente, como ya se ha mencionado en el apartado 8.2, completar el estudio del efecto local con más información (mapas geomorfológicos y perfiles multidimensionales), incluso llegar a cuantificar la relación entre el daño y factores como la pendiente o la morfología del terreno.

Asimismo, convendría estudiar posibles efectos de interacción suelo-estructura, ya que existen datos del periodo natural del suelo en al menos 30 puntos de la ciudad y se tiene la distribución de edificios por alturas.

Una vez obtenido el modelo de cálculo de riesgo sísmico para Puerto Príncipe, se pueden simular otros escenarios deterministas, e incluso se pueden reproducir los escenarios que resulten del estudio de peligrosidad probabilista del proyecto Sismo-Haití.

Además, se puede continuar trabajando en el modelo de cálculo, aportando información censal y de costes, para estimar pérdidas humanas y económicas.

A partir de los resultados que se obtienen de estos estudios de riesgo sísmico, se podría realizar un análisis de resiliencia y proponer medidas concretas para hacer de la sociedad haitiana una sociedad consciente del peligro sísmico y preparada para hacerle frente.

13. Difusión del trabajo

Son numerosas las publicaciones a las que ha dado lugar este TFM. A continuación se exponen cronológicamente:

4º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica (mayo, 2011)

Entre los días 18 a 20 de mayo de 2011 se celebró en Granada el 4º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica (4CNIS), en el que se presentó una ponencia y se organizó una mesa redonda sobre el proyecto SISMO-HAITÍ en el que se enmarca este Trabajo Fin de Máster. La ponencia llevaba por título "SISMO-HAITÍ: Proyecto de Cooperación para el Cálculo de la Peligrosidad y el Riesgo Sísmico en Haití" (Figura 65). Se presentaron los avances del proyecto hasta aquel momento en sus diferentes actividades programadas.



Figura 65. Primera diapositiva de la ponencia que se presentó en el 4CNIS.

Fall Meeting de la American Geophysical Union (diciembre, 2011)

Del 5 al 9 de diciembre de 2011 se celebró en San Francisco (USA) el congreso de la American Geophysical Union y se presentó el estudio preliminar de riesgo sísmico en Puerto Príncipe, con un modelo de cálculo aún sin calibrar (Figura 66). El trabajo se presentó en formato póster, liderado por el Dr. Sergio Molina, tutor de este Trabajo Fin de Máster. Su título era: "Seismic Risk Scenarios in Port au Prince (Haití). A Tool for Reconstruction and Emergency Planning".



Figura 66. Encabezado del póster enviado a la AGU-2011

7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica (junio 2012)

Esta asamblea tuvo lugar entre los días 25-29 de junio de 2012 en San Sebastián. Se presentó una ponencia donde se expuso el nuevo cálculo de riesgo con el modelo calibrado (Figura 67).

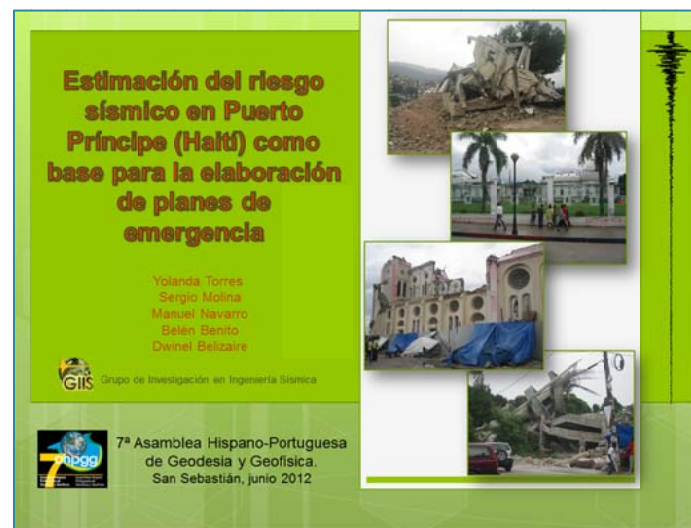


Figura 67. Primera diapositiva de la ponencia que se presentó en la 7ª A.H.P.G.G.

Trabajos aceptados en futuros congresos

Ya han sido aceptados en futuros congresos 2 ponencias más:

33rd General Assembly European Seismological Commission, que se celebrará entre el 19-24 de agosto de 2012, en Moscú. Se presenta el proceso de calibración con detalle y su utilidad para futuras aplicaciones (Figura 68).

USING 2010 HAITI EARTHQUAKE DATA FOR CALIBRATION OF FUTURE
SEISMIC RISK SCENARIOS IN PORT-AU-PRINCE (HAITI)

S.M. Molina¹, Y.T. Torres², M. N. Navarro³, B.B. Benito², J.M. Moise⁴

1- University of Alicante

2 - Technical University of Madrid

3- University of Almeria

4 - National Observatory of the Environment and Vulnerability of Haiti

After the 12 January 2010 earthquake that hit the city of Port-au-Prince, capital of Haiti, big efforts have been done to scientifically understand the impact and the factors that provoked such catastrophe. The main goal is to develop strategies to minimize the seismic risk. One important task to reach this objective is the evaluation of future seismic risk scenarios what provides information about the impact of the most probable or possible hazards.

This study pretends to give an additional step to previous scientific works in the country by providing a detailed analysis of the damage and costs that two scenario earthquakes (proposed after disaggregation of seismic hazard and from a tectonic analysis of relevant faults) will have in Port-au-Prince. It has been conducted in the frame of the Sismo-Haiti project, supported by the Technical University of Madrid, which started two months after the 2010 earthquake as an answer to a required help by the Haiti government.

Figura 68. Encabezado del resumen enviado ala 33rd. G.A.E.S.C.

X Congreso TopCart, que se celebrará los días 16-19 de octubre de 2012, en Madrid. Se presenta el SIG Sismo-Haití como herramienta de apoyo para este estudio, especialmente, en la fase de calibración del modelo de cálculo (Figura 69). Se ha enviado ya el artículo y ha sido revisado por pares y aceptado.

X CONGRESO TOPCART 2012 - I CONGRESO IBEROAMERICANO DE GEOMÁTICA Y C.C. DE LA TIERRA COITop 2012

1

APLICACIÓN SIG EN RIESGOS NATURALES: CALIBRACIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO
DEL RIESGO SÍSMICO DE PUERTO PRÍNCIPE (HAITI)

YOLANDA TORRES
Universidad Politécnica de Madrid,
E.T.S.I. Topografía, Geodesia y
Cartografía
y.torres@upm.es

SERGIO MOLINA
Universidad de Alicante,
Facultad de ciencias
sergio.molina@ua.es

BELÉN BENITO
Universidad Politécnica de Madrid,
E.T.S.I. Topografía, Geodesia y
Cartografía
mariabelen.benito@upm.es

Resumen: En este artículo se presenta un modelo de cálculo de riesgo sísmico para Puerto Príncipe, calibrado a partir de los daños causados por el terremoto de 2010. Se ha implementado un Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta de apoyo. En el estudio se han definido 8 tipologías constructivas representativas de los edificios de la

calculation model obtained in this study will be applied in the seismic risk assessment of Port au Prince, which is one of the phases of the SISMO-HAITI cooperative project. Its results would be used when defining the emergency plans against this kind of natural risks, whose ultimate goal is the reduction of the negative consequences of future earthquakes.

Figura 69. Encabezado del artículo enviado al X Congreso TopCart



14. Referencias

- Abrahamson N.**, y W. Silva, (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*, 24, 1, 67-98.
- Ali**, S. T., Freed, A. M., Calais, E., Manaker, D. M. y McCann, W.R. (2008). Coulomb stress evolution in northeastern Caribbean over the past 250 years due to coseismic, postseismic, and interseismic deformation. *Geophys. J. Int.* 174, 904-918
- ATC** (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Technical report, Applied Technology Council (ATC), Redwood City, California. Report ATC-40.
- Benito**, B., J.M. Gaspar-Escribano, J. Martínez-Díaz, M.J. García Rodríguez, M.E. Jiménez Peña, C. Canora, y J.A. Álvarez-Gómez (2008). An approach for identification of áreas with higher expected damage and definition of priority levels for prevention plans in Murcia Province (SE Spain). *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*. Vol 49, n. 1, pp. 3-15.
- Benito**, B., M. Navarro, F. Vidal, J.M. Gaspar-Escribano, M.J. García Rodríguez, J.M. Martínez-Solares (2010). A new seismic hazard assessment in the región of Andalusia (Southern Spain). *Bull. Earthquake Eng.* 8:739-766. DOI 10.1007/s10518-010-9175-9.
- Bilham**, R (2010): Lessons from the Haiti earthquake. *Nature*, vol 463, pp. 878-879.
- Blondet**, M. (ed.) (2005). Construcción y Mantenimiento de Viviendas de Albañilería, Segunda edición. Lima, Perú.
- Boore** D. M. y G.M. Atkinson, (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24, 1, 99-138.
- Bozzoni**, F., M. Corigliano, G. Lai, W. Salazar, L. Scandella, E. Zuccolo, J. Latchman, L. Lynch and R. Robertson (2011). Probabilistic Seismic Hazard Assessment at the Eastern Caribbean Islands. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol 101, no. 5, pp. 2499-2521.
- Calais**, E., Y. Mazabraud, B. Mercier de Lépinay, P. Mann, G. Mattioli y P. Jansma (2002). Strain partitioning and fault slip rates in the northeastern Caribbean from GPS measurements. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 29, nº 18, 1856.
- Calais**, E., A. Freed, G. Mattioli, F. Amelung, S. Jónsson, P. Jansma, S. Hong, T. Dixon, C. Prépetit and R. Momplaisir, (2010). Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake, *Nature Geosciences*, 3, 794-799.
- Campbell**, K.W. y Y. Bozorgnia, (2008). NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24, 1, 139-172.
- Chiou**, B. S.-J y R.R. Youngs, (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 24, 1, 173-216.



Chrysostomou, C., D. Hadjimitsis, A. Agapiou y N. Kyriakides (2010). Seismic Risk Assessment for Historical Town Centers and Their Surroundings Using Geoinformatics: the case study of Paphos, Cyprus. M Ioannides (Ed.): EuroMed 2010, LNCS 6436, pp. 528-535. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Cox, B., J. Bachhuber, E. Rathje, C. Wood, R. Dulberg, A. Kottke, R. Green y S. Olson (2011). Shear Wave Velocity- and Geology-Based Seismic Microzonation of Port-au-Prince, Haiti. *Earthquake Spectra*, Vol. 27, No. S1, pag. S67-S92

De Mets, C., R.G., Gordon, D.F., Argus, S., Stein, (1994). Effect of recent revisions of the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21: 2191-2194

Ding, X., X. Wang, L. Wang y Y. Zheng (2011). The development of catastrophe earthquake risk estimation system based on GIS. Publicación en la conferencia Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International, 24-29 julio 2011, pp. 4352-4354.

DOGC (2003). Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya, Resolución JUI/1915/2003, de 20 de mayo, por el que se da publicidad al acuerdo del Gobierno de 13 de mayo por el que se aprueba el plan especial de emergencias sísmicas de Cataluña (SISMICAT), DOGC N. 3912 de 26/672003, p. 12896. Disponible en: <<http://www.gencat.net/interior/leg/2003r1915.pdf>> [último acceso: 23 de marzo de 2007] (en catalán).

Dolan, J. F., P., Mann, (Eds.) (1998). Active Strike-Slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone. Geological Society of America. Special Paper, 326: 1-17.

Eberhard, M.O., S. Balbridge, J. Marshall. W. Mooney y J.R.Glenn (2010). "The Mw 7.0 Haiti Earthquake of January 12, 2010: USGS/EERI Advanced Reconnaissance Team Report". USGS Internal Report.

EERI (2010). "Learning from Earthquakes: The Mw 7.0 Haiti Earthquake of January 12, 2010". Special Earthquake Report.

FEMA (2001): Federal Emergency Management Agency. 2000 Edition NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1, Provisions. FEMA-368 and Part 2, Commentary. FEMA-369. Washington, DC.

FEMA (2003): HAZUS-MH: Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., United States.

FEMA (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project), Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C., United States, June 2005.

Fierro, E. and C. Perry. (2010). "Preliminary Reconnaissance Report – 12 January 2010 Haiti Earthquake". BFP Engineers. 12 pp.



Frankel, A., S. Harmsen, C. Mueller, E. Calais and J. Haase (2011): Seismic Hazard Maps for Haiti. *Earthquake Spectra*, vol 27, S23-S24 pp.

Granja, J.L. (2008): Geodinámica del borde Sur de las Antillas Mayores oriental. Universidad Complutense de Madrid (UCM). Facultad de Ciencias Geológicas. Departamento de Geodinámica.

Hayes, G. P., R. W. Briggs, A. Sladen, E. J. Fielding, C. Prentice, K. Hudnut, P. Mann, F. W. Taylor, A. J. Crone, R. Gold, T. Ito and M. Simons, (2010). Complex rupture during the 12 January 2010 Haiti earthquake, *Nature Geosciences*, 3, 800-805.

Hill M. y T. Rossetto (2008). Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modeling in Europe. *Bull Earthquake Eng.* DOI 10.1007/s10518-007-9057-y

Kaklamanos, J., S.M.EERI, L. G. Baise, M.EERI, y D. M. Boore (2011). Estimating Unknown Input Parameters when Implementing the NGA Ground-Motion Prediction Equations in Engineering Practice. *Earthquake Spectra*: November 2011, Vol. 27, No. 4, pp. 1219-1235.

Kelleher, J., L., Sykes, y J., Oliver, (1973). Possible criteria for predicting earthquake locations and their application for major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean, *Journal of Geophysical Research* 78, 2547–2585.

Lagomarsino, S. y S. Giovinazzi (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull. Earthq. Eng.*, 4,4, 415-443.

Lang, A. y J. Marshall (2011). Devil in the Details: Success and Failure of Haiti's Nonengineered Structures. *Earthquake Spectra*, Vol 27, No. S1, pp S345–S372

Lang, D.H., Molina, S., y Lindholm, C.D. (2008). Towards near-real-time damage estimation using a CSM-based tool for seismic risk assessment, *Journal of Earthquake Engineering* 12 (S2), pp. 199–210

Lantada, N., L. Pujades y A. Barbat (2009). Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison. *Natural Hazards*, vol 51, Nº 3, pp. 501-524. DOI: 10.1007/s11069-007-9212-4

Manaker, M., E. Calais, A. M. Freed, S. T. Ali, P. Przybylski, G. Mattioli, Jansma, C Prépetit y J. B. de Chaballier, (2008). Interseismic Plate coupling and strain partitioning in the Northeastern Caribbean, *Geophysical Journal International*, 174, 889–903.

Mann, P., K., Burke, y T., Matumoto, (1984). Neotectonics of Hispaniola: Plate motion, sedimentation, and seismicity at a restraining bend. *Earth Planet. Sci. Lett.* 70, 311-324

Mann, P., (1999). Caribbean Sedimentary Basins: Classification and Tectonic Setting from Jurassic to Present. En Hsü, K. J., (Series Ed.). *Sedimentary Basins of the World*, 4. Caribbean Basins. Mann, P. (Ed.), Elsevier Science, N. Y. 4: 3-31.



Mann P., E. Calais, J.-C. Ruegg, C. DeMets, P. E. Jansma y G. S. Mattioli (2002).. Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations, *Tectonics*, VOL. 21, NO. 6, 1057, doi:10.1029/2001TC001304, 2002.

Marshall, J., A. Lang, S. Baldrige y D. Popp (2011) Recipe for Disaster: Construction, Methods, Materials, and Building Performance in the January 2010 Haiti Earthquake. *Earthquake Spectra*, Vol 27, No. S1, pp S323–S343.

McCann, W.R. (2006): in *Caribbean Tsunami Hazard* (eds Aurelio, M. & Philip, L.) 43-65 World Scientific.

Milutinovic, Z.V., y G.S. Trendafiloski, (2003) RISK-UE, An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Report to WP4: Vulnerability of current buildings. September 2003, 109 pp.

Mix D., T. Kijewski-Correa, y A. A. Taflanidis (2011). Assessment of Residential Housing in Léogâne, Haiti, and Identification of Needs for Rebuilding after the January 2010 Earthquake, *Earthquake Spectra* 27, S1, 299-322, DOI:10.1193/1.3637942

Molina, S., Lang, D.H., y Lindholm, C.D. (2010). SELENA: An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure. *Computers & Geosciences* 36, pp. 257–269

Molina, S., y Lindholm, C.D. (2007). Estimation the confidence of earthquake damage scenarios: examples from a logic tree approach, *Journal of Seismology* 11 (3), pp. 399–310

Munich Re (2010). *Topics Geo: Catástrofes Naturales 2010. Análisis, valoraciones, posiciones. Informe de 2010*

Pérez-Estaún, A., P. P., Hernaiz Huerta, E., Lopera, M., Joubert, Grupo Sysmin (J., Escuder-Virue, A., Diaz De Neira, J., Monthel, J., García-Senz, P., Ubrien, P., Contreras, E., Bernárdez, G., Stein, I., Deschamps, J. L., García-Lobón, C. Ayala,) 2007. Geología de la República Dominicana: de la construcción de arco-isla a la colisión arco-continente. *Boletín Geológico y Minero*, 188(2):157-174.

Prentice, C.S., Mann, P., Pea, L.R. & Burr, G., (2003). “Slip rate and earthquake recurrence along the central Septentrional fault, North American-Caribbean plate boundary, Dominican Republic”. *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.129/2001JB000442.

Prentice, C. S., P. Mann, A. J. Crone, R. D. Gold, K. W. Hudnut, R. W. Briggs, R. D. Koehler y P. Jean, (2010). Seismic hazard of the Enriquillo–Plantain Garden fault in Haiti inferred from palaeoseismology, *Nature Geosciences*, 3, 789-793.

Pubellier, M., A., Mauffret, S., Leroy, J. Vila, y H. Amilcar, (2000). Plate boundary readjustment in oblique convergence: Example of the Neogene of Hispaniola, Greater Antilles. *Tectonics* 19, 630648



Rathje E. M., J. Bachhuber, R. Dulberg, B. R. Cox, A. Kottke, C. Wood, R. A. Green, S. Olson, D. Wells y G. Rix (2011). Damage Patterns in Port-au-Prince during the 2010 Haiti Earthquake, *Earthquake Spectra* 27, S1, 117-136, DOI:10.1193/1.3637056

Rosencrantz, E., M. I., Ross, J. G., Sclater, (1988). Age and spreading history of the Cayman Trough as determined from depth, heat flow and magnetic anomalies. *Journal of Geophysical Research*, 93: 2141-2157

Rukstales, K. S., M. D. Petersen, A. D. Frankel, S. C. Harmsen, D. J. Wald, V. R. Quitoriano, y K. M. Haller (2011). Earthquake Scenarios Based Upon the Data and Methodologies of the U.S. Geological Survey's National Seismic Hazard Mapping Project. Presentado en la American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, abstract #PA51A-1797.

Sahar, L., S. Muthukumar y S.P. French. (2010). Using Aerial Imagery and GIS in Automated Building Footprint Extraction and Shape Recognition for Earthquake Risk Assessment of Urban Inventories. *Geoscience and Remote Sensing*. vol 48, Issue 9, pp. 3511-3520.

Sarris, A., C. Loupasakis, P. Soupios, V. Trigkas y F. Vallianatos (2010). Earthquake vulnerability and seismic risk assessment of urban areas in high seismic regions: application to Chania City, Crete Island, Greece. *Natural Hazards*, vol. 54, Nº 2, pp. 395-412, DOI: 10.1007/s11069-009-9475-z

Scherer, J., (1912). Great earthquakes in the island of Haiti, *Bull. Seism. Soc. of Am.* 2, 161-180.

Ten Brink, U. S., D. F., Coleman, y W. P., Dillon, (2002). The nature of the crust under Cayman Trough from gravity. *Marine and Petroleum Geology*, 19(8): 971-987.

Vacareanu, R., D. Lungu, A. Aldea, C. Arion (2004). RISK-UE, An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP7 Report: Seismic Risk Scenarios Handbook

Weber, J. C., T. H., Dixon, C., Demets, W., Ambeh, P., Jansma, G., Mattioli, J., Saleh, G., Sella, R., Bilham, y O., Pérez, (2001). GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South American plates, and geologic implications for Trinidad and Venezuela. *Geology*. 29 (1): 75-78.

Wieland, M., M. Pittore, S. Parolai, J. Zschau, B. Moldobekov y U. Begaliev (2012). Estimating building inventory for rapid seismic vulnerability assessment: Towards an integrated approach based on multi-source imaging. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. vol 36, pp. 70-83.

Recursos en internet:

ARCGIS RESOURCE CENTER (2012): <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/003n0000001000000/> (acceso 02-07-2010)

ASTER, 2010: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/> (acceso 15-10-2010)



MINUSTAH, 2010: <http://www.un.org/es/peacekeeping/missions/minustah/> (acceso 11-11-2010)

USGS, terremoto de Haití: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010rja6/> (acceso 15-05-2012).

USGS, terremoto de Chile: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010tfan/#details>, (acceso 15-05-2012).

USGS, terremoto de Japón: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/> (acceso 15-05-2012)



15. Anexos

15.1. Normativa de Riesgos Laborales

El objetivo de este apartado es dar a conocer los principales aspectos de las normas técnicas de ámbito europeo e internacional referidas al diseño ergonómico de puestos que utilizan equipos con pantallas de visualización de datos (PVD). Está basado, principalmente, en el contenido de las normas técnicas desarrolladas en el seno del Comité Europeo de Normalización (CEN) en colaboración con ISO, concretamente en las normas ISO-9241.

Se han recogido los aspectos más relevantes de la citada normativa, abarcando, en su conjunto, los aspectos concernientes a los equipos, al diseño físico del lugar de trabajo, la adecuación del medio ambiente físico, los aspectos básicos del diseño de tareas y los principios a considerar en la llamada "ergonomía del software".

En todo caso, en España es necesario tener en cuenta los requisitos mínimos legales establecidos en el Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, referente a las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.

Requerimientos de la directiva 90/270/CEE para la pantalla

- 1) Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones.
- 2) La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad.
- 3) El usuario de PVD's deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y/o el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, así como adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno.
- 4) La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad y con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario.
- 5) Podrá utilizarse un soporte independiente o una mesa regulable para la pantalla.
- 6) La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.



Requerimientos del R. D. 488/1997 para el teclado

- 7) El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en brazos y manos.
- 8) La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos.
- 9) La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar la utilización del teclado.
- 10) Los símbolos de las teclas deberán resultar suficientemente legibles desde la posición normal de trabajo.
- 11) Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos o las manos.

Requerimientos del R. D. 488 / 1997 para la silla de trabajo

- 12) El asiento de trabajo habrá de ser estable, proporcionar al usuario libertad de movimientos y procurarle una postura confortable.
- 13) La altura del asiento deberá ser regulable.
- 14) El respaldo deberá ser reclinable, y su altura, ajustable.
- 15) Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.

Requerimientos del R. D. 488 / 1997 para la mesa, superficies y espacio de trabajo

- 16) La mesa de trabajo habrá de tener una superficie poco reflectante, ser de dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio.
- 17) El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estar colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y los ojos.
- 18) El espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.
- 19) El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente para permitir cambiar de postura y de movimientos de trabajo.



Requerimientos del R. D. 488/1997 para la iluminación

- 20) La iluminación general y la iluminación especial (lámparas de trabajo), cuando sea necesaria, deberán garantizar unos.
- 21) El acondicionamiento del lugar de trabajo y del puesto de trabajo, así como la situación y las características técnicas de las fuentes de luz artificial deberán coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y reflejos molestos en la pantalla u otra parte del equipo.

Reflejos y deslumbramientos:

- 22) Los puestos de trabajo deberán instalarse de tal forma que las fuentes de luz, como ventanas y otras aberturas, tabiques transparentes o translúcidos y los equipos o tabiques de color claro no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos molestos en la pantalla.
- 23) Las ventanas deberán estar equipadas con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.

Requerimientos del R. D. 488/1997 para el ruido

- 24) El ruido producido por los equipos del puesto de trabajo o los del entorno deberá tenerse en cuenta al diseñar el puesto de trabajo, en especial para que no se perturbe la atención ni la palabra.

Requerimientos del R. D. 488/1997 sobre temperatura y humedad

- 25) Los equipos del puesto o puestos de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.
- 26) Habrá que crear y mantener una humedad aceptable.

Requerimientos del R. D. 488/1997 sobre emisiones

- 27) Toda radiación, excepción hecha de la parte visible del espectro electromagnético, deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección, seguridad y salud de los trabajadores.

Requerimientos del R. D. 488/1997 para la interconexión ordenador/persona

Para la elaboración, elección, compra y modificación de programas, así como para la definición de las tareas que requieran pantallas de visualización, el empresario tendrá en cuenta los siguientes factores:

- 28) El programa habrá de estar adaptado a la tarea a realizar.



- 29) El programa habrá de ser fácil de utilizar y deberá, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados de esta consulta con sus trabajadores.
- 30) Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.
- 31) Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y a un ritmo adaptado a los operadores.
- 32) Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte del hombre.

Requerimientos del R. D. 488 / 1997 sobre organización del trabajo con PVD's

Formación de los trabajadores

Todo trabajador debe recibir una formación sobre las modalidades de uso de los equipos con pantallas de visualización, antes de comenzar este tipo de trabajo y cada vez que la organización del puesto de trabajo se modifique de manera apreciable.

Consulta y participación

La consulta y participación sobre las cuestiones a las que se refiere este R. D. se realizará de acuerdo con lo dispuesto en el art. 18 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales

Vigilancia de la Salud

Se deberá ofrecer a los trabajadores en las siguientes ocasiones:

- 33) Antes de comenzar a trabajar con una pantalla de visualización.
- 34) Posteriormente, con una periodicidad ajustada al nivel de riesgo a juicio del médico responsable.
- 35) Cuando aparezcan trastornos que pudieran deberse a este tipo de trabajo.
- 36) Cuando los resultados de la citada vigilancia de la salud lo hiciesen necesario, los trabajadores tendrán derecho a un reconocimiento oftalmológico.

15.2. Impacto Ambiental

En virtud de lo establecido en la Ley 6/2001 de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto Legislativo 1302/1986 de 28 de junio y en la Ley Foral 4/2005, de 22 de marzo, el presente estudio no se encuentra sometido al procedimiento administrativo de evaluación de impacto medioambiental, puesto que su ejecución no afecta al medioambiente. No obstante, su hubiese sido necesario se habrían tenido en cuenta las normas ISO 14000.